

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

NOVE TEHNOLOGIJE NUKLEARNIH
TERMOELEKTRANA

Diplomski rad

Ivana Josipović

Osijek, 2017. godina.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

NOVE TEHNOLOGIJE NUKLEARNIH
TERMOELEKTRANA

Diplomski rad

Mentor: prof.dr.sc. Damir Šljivac

Osijek, 2017. godina.

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	UVOD U NUKLEARNE REAKCIJE	2
2.1.	Uloga i upotreba nuklearne energije	2
2.2.	Lančana reakcija	3
2.3.	Udarni presjek	5
2.4.	Faktor multiplikacije	8
2.5.	Reaktivnost reaktora	9
3.	NUKLEARNE ELEKTRANE	11
3.1.	Uvod	11
3.2.	Nuklearni reaktor	13
3.3.	Podjela nuklearnih reaktora	16
4.	NAPREDNE TEHNOLOGIJE NUKLEARNIH REAKTORA	20
4.1.	Reaktori treće generacije	20
4.1.1.	Europski tlačni reaktor (EPR)	20
4.1.2.	Usavršeni tlačni reaktor (APWR)	22
4.1.3.	Usavršeni pasivni reaktor (AP1000)	23
4.1.4.	IRIS – „Inovativni i sigurni međunarodni reaktor“	25
4.1.5.	Ekonomični pojednostavljeni reaktor s kipućom vodom (ESBWR)	27
4.1.6.	Usavršeni kipućom vodom hlađeni reaktor (ABWR)	29
4.2.	Reaktori četvrte generacije	30
4.2.1.	Plinom hlađen brzi reaktor (Helij) (GFK)	31
4.2.2.	Brzi reaktor hlađen olovom (LFR)	32
4.2.3.	Reaktori s rastaljenim solima (MSR)	33
4.2.4.	Natrijem hlađeni brzi reaktor	34
4.2.5.	Superkritični lakovodni reaktori (SCWR i SCFR)	35
4.2.6.	Vrlo visoko temperaturni plinom hlađeni reaktor (VHTR)	37

5. TERMODINAMIČKA ANALIZA ELEKTRANA	39
5.1. Termodinamički proračun termonuklearne elektrane sa BWR	39
5.1.1. Općenito o reaktoru hlađenom i moderiranom s kipućom vodom (BWR)	39
5.2. Termodinamički proračun VHTR termonuklearne elektrane	47
5.2.1. Općenito o vrlo visokotemperaturnom reaktoru	47
5.3. Usporedba dobivenih rezultata	51
ZAKLJUČAK	52
LITERATURA	54
SAŽETAK	55
ABSTRACT	55
ŽIVOTOPIS	56

1. UVOD

Nuklearna energija izdvaja se kao jedno od mogućih rješenja problema rastuće potrebe čovječanstva za električnom energijom. U zadnja tri desetljeća nuklearna energija ima značajnu ulogu u proizvodnji električne energije. Oko 16% ukupno proizvedene električne energije u svijetu trenutačno se dobiva pomoću nuklearne energije. Jaki proboj nuklearne energije može se zahvaliti njezinoj čistoći i gotovo nikakvim ispuštanjem stakleničkih plinova. Do sad se u svijetu nakupilo ukupno više od 9000 godina rada nuklearnih reaktora, pa se akumuliralo i potrebno iskustvo u iskorištavanju te energije. Kao i svi procesi proizvodnje energije iz neobnovljivih izvora i nuklearne elektrane proizvode otpad. Tu spadaju radioaktivni otpad i vruća voda. Budući da nuklearne elektrane ne proizvode ugljikov dioksid, njihovom uporabom se ne povećava efekt staklenika. Radioaktivni otpad dijeli se na dvije osnovne kategorije; niskoradioaktivni i visokoradioaktivni otpad. Većina nuklearnog otpada je niskoradioaktivna. Kod nuklearnih elektrana pravi problem predstavlja ostatak iskorištenog goriva. To je visokoradioaktivni otpad koji se mora skladištiti ili u suhim kontejnerima ili u specijalnim bazenima s vodom, gdje voda ohladi nuklearno gorivo i ponaša se kao štit od radijacije. Starije i manje radioaktivno gorivo skladišti se u suhim skladištima. Tamo se zatvara u specijalno konstruirane kontejnere iz armiranog betona. Pravilno kontroliran rad nuklearne elektrane ne utječe na okoliš. Međutim, nepravilno korištenje izaziva mogućnost katastrofe i velika je prijetnja okolišu. U mirnodopskom iskorištavanju nuklearne energije dosad su se u svijetu dogodile tri velike havarije, i to: 1979. - godine "Otok tri milje", (Pennsylvania, SAD), 1986. godine - Chernobyl (Ukrajina) i nedavno, 2011. godine - Fukushima (Japan), dok je manjih problema bilo dosta, ali su nasreću uspješno otklonjeni.

U uvodnom poglavlju ovoga rada opisane se osnovne nuklearne reakcije koje se odvijaju u radu nuklearne elektrane te koje su potrebne za shvaćanje principa rada nuklearnog postrojenja. U slijedećim poglavljima baviti ćemo se vrstama i tehnologijama III. i IV. generacije nuklearnih reaktora. Uz opisane karakteristike pojedinih reaktora, prikazana su i poboljšanja u odnosu na prethodne vrste i generacije. U petom poglavlju rada sastoji se od dvije termodinamičke analize Rankineova ciklusa pojednostavljenog reaktora hlađenog i moderiranog s kipućom vodom (BWR) te vrlo visokotemperaturnog reaktora (VHTR). Spomenuti BWR reaktor pripada II generaciji reaktora dok VHTR IV generaciji. Usporedbom dva odabrana reaktora prikazati ćemo prednosti i poboljšanja u izvedbi i proizvodnji električne energije.

2. UVOD U NUKLEARNE REAKCIJE

2.1. Uloga i upotreba nuklearne energije

U elektranama sa klasičnim gorivom kemijska energija goriva pretvara se u toplinsku energiju tijekom procesa sagorijevanja koji predstavlja spajanje atoma ugljika i kisika. Toplinska energija se pojavljuje uslijed promjene u vezama između atoma. U nuklearnim elektranama energija se oslobađa uslijed promjena u unutrašnjosti samih atoma.

Klasični izvori energije, koje čine vodene snage i goriva organskog podrijetla (ugljen, nafta, drvo), ne mogu zadovoljiti sve veću potrošnju električne energije. Vodene snage koje se mogu ekonomično iskoristiti su vrlo ograničene, a zalihe goriva organskog podrijetla neprekidno se smanjuju. Zbog toga se sve više prelazi na korištenje nuklearne energije koja može zadovoljiti sve veće energetske potrebe.

Prvu kontroliranu nuklearnu lančanu reakciju ostvario je poznati fizičar Enrico Fermi sa grupom istraživača i tehničara 2. prosinca 1942. godine i dokazao dotad nepoznatu pojavu- oslobađanje energije atomskih jezgri i njezinu upotrebu. Danas kontrolirana atomska energija pokreće generatore u velikom broju nuklearnih elektrana diljem svijeta. Nuklearni reaktori su električne snage od nekoliko tisuća MW te se stalno izrađuju nove jedinice većih snaga.

Nuklearne elektrane su pored proizvodnje električne energije veliki izvor radioaktivnog ionizirajućeg zračenje i radioaktivnih otpadaka. Zbog toga su sigurnost rada, lokacija, ispuštanje radioaktivnih materijala, zaštita osoblja i okolne životne sredine najbitnija pitanja pri gradnji nuklearne elektrane. Također treba uzeti u obzir investicije izgradnje nuklearnih elektrana koje su dva puta veće od investicija izgradnje termoelektrana iste snage. Međutim, troškovi goriva po jedinici proizvedene električne energije su oko dva puta manji od istih u termoelektrani.

Poznato je da se jezgra atoma svih elemenata sastoji od protona i neutrona koji čine teške čestice atoma i osnovne čestice materije. Proton je pozitivno naelektriziran istom količinom elekticiteta kao i elektron, ali ima preko 1800 puta veću masu u stanju mirovanja od elektrona. Neutron je električki neutralan i ima nešto veću masu od protona. Broj protona u atomskoj jezgri nekog elementa jednak je rednom broju tog elementa u Periodnom sustavu elemenata. Redni broj elementa određuje kemijska svojstva tog elementa. Postoje i atomi koji imaju isti redni broj, ali

različita fizička svojstva. Takvi atomi se nazivaju izotopi, a razlikuju se međusobnim brojem neutrona u jezgri.

Većina kemijskih elemenata koji se nalaze u prirodi imaju stabilnu atomsku jezgru, izuzev nekoliko teških elemenata. Elementi sa nestabilnom jezgrom nazivaju se radioaktivni elementi. Uslijed pojave radioaktivnosti iz atomske jezgre se emitiraju α -, β -, γ - čestice.

U prirodi postoje tri vrste radioaktivnog elementa koji počinju sa uranom 238 (U-238), torij 232 (Th-232) i uranom 235 (U-235). Kod sve tri vrste radioaktivnih elemenata posljednji element u radioaktivnom raspadanju je olovo, ali s različitim atomskim težinama (Pb-204, Pb-208 i Pb 207). Pored prirodnih radioaktivnih izotopa, na umjetni način se proizvodi veliki broj radioaktivnih izotopa i to na slijedeće načine:

- apsorpcijom neutrona u stabilnoj jezgri u nuklearnim reaktorima
- raspadanjem teških jezgara, pri čemu nastaje novi radioaktivni element
- bombandiranjem stabilnih jezgara pomoću ubrzanih čestica u akceleratorima.

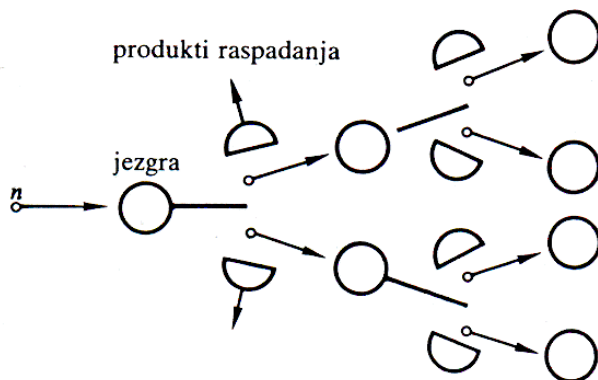
Raspadanjem jezgre urana 235 oslobađa se oko 25000 kWh energije po gramu U-235. koja se koristi u postrojenjima nuklearnih elektrana. Industrijsko korištenje nuklearne energije omogućeno je kontroliranim procesom brzine raspadanja i količinom oslobođene energije. Izotop urana U-235 je jedini kemijski element koji se u prirodnom stanju upotrebljava kao nuklearno gorivo. Nalazi se prirodnom uranu koji je mješavina U-238 (99,3%) i U-235 (0,7%). Uran U-238 može se upotrijebiti kao nuklearno gorivo, ali se mora prvo na umjetan način, bombandiranjem s neutronima, kako bi se dobio plutonij 239 (Pu-239), koji predstavlja umjetno nuklearno gorivo. Torij 232 (Th-232) bombandiranjem neutrona prelazi u uran-233 koji je također umjetno nuklearno gorivo.

Energetske rezerve urana i torija u svijetu su preko 10 veće od energetske rezervi fosilnih goriva. U budućnosti se zbog toga očekuje sve veće korištenje nuklearne energije u ukupnoj potrošnji.

2.2. Lančana reakcija

Samostalno održavanje raspada jezgara zasniva se na pojavi da se nakon raspada jedne jezgre pojavi najmanje jedan neutron sposoban izazvati raspad jezgre. U prosjeku, međutim, raspadom jezgre U-235 nastaje 2,5 neutrona. U daljnjem izlaganju govorit će se o U-235, ali uz napomenu da se Pu-239 u principu vlada slično izotopu urana U-235. Broj raspadnutih jezgara rast će po

zakonu 2^n , gdje je n broj sukcesivnih raspada, ili – kako se često naziva - broj generacija neutrona. Lančana reakcija je ispunjena u atomskoj bombi, koja je u prvoj izvedbi bila izgrađena od čistog U-235. U reaktoru s prirodnim uranom (99,282 % U-238, 0,712 % U-235 i 0,006 % U-234) kao gorivom ili s obogaćenim uranom (smjesa U-238 i U-235, ali s većim postotkom U-235 nego u prirodnom uranu) prilike su sasvim drugačije. Potrebne su, naime, posebne tehničke mjere da najmanje jedan neutron proizveden raspadom jedne jezgre izazove raspad druge jezgre. Prikaz spomenute reakcije prikazan je na slici 2.1. [1]

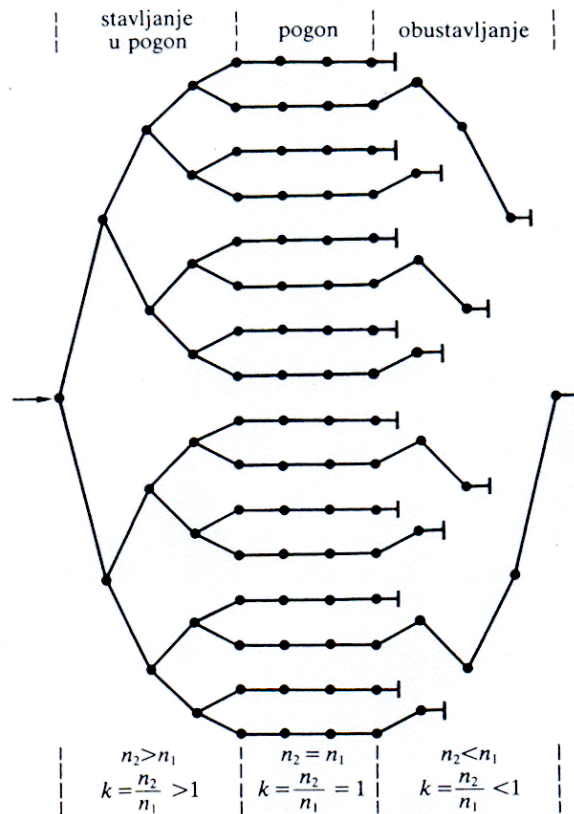


Slika 2.1. Shematski prikaz lančane reakcije [1]

Ako s n_2 označimo broj neutrona u nekoj generaciji, a s n_1 njihov broj u prethodnoj generaciji, za vrijeme stavljanja u pogon mora biti $n_2 > n_1$. Pomoću broja neutrona iz dvije sukcesivne generacije definira se faktor multiplikacije k , određen izrazom:

$$k = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-1)$$

Pri stavljanju u pogon mora biti (lijevi dio slike 2.2. – stavljanje u pogon) $k > 1$. Kad je dostignut broj neutrona u jedinici vremena nužan za potrebnu snagu, mora se održavati konstantnost broja neutrona, pa je tada $n_2 = n_1$ (srednji dio slike 2.2. – pogon).



Slika 2.2. Shema povećanja i smanjenja broja neutrona za vrijeme stavljanja reaktora u pogon, u toku njegova rada i obustavljanja [1]

Kad se želi obustaviti rad reaktora, treba stvoriti takve prilike da iz generacije u generaciju opada broj neutrona, dakle da bude $n_2 < n_1$ i faktor multiplikacije postane manji od 1 ($k < 1$). [1]

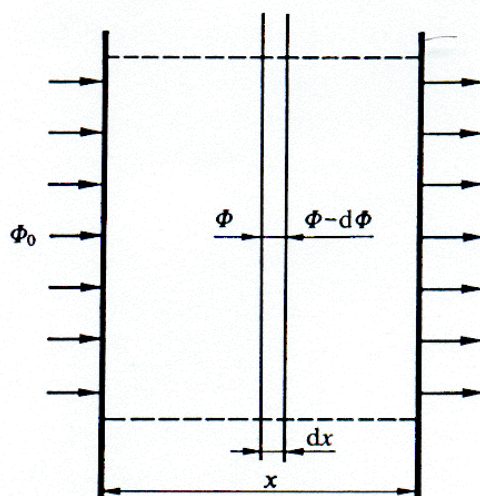
2.3. Udarni presjek

Prodor čestica koje nose električni naboj, kao što su alfa-čestice ili protoni, relativno je slab zbog djelovanja elektrostatičkih sila između čestice i elektrona u atomima. Nasuprot tome, neutroni, koji su električno neutralni, mogu znatno lakše prodirati kroz materiju i prijeći relativno duge puteve. Samo pri sudaru s jezgrama, koje imaju vrlo male dimenzije, neutroni mogu u sudaru izgubiti od svoje kinetičke energije ili biti apsorbirani. Vanjska magnetska i električna polja ne utječu na njihovo kretanje. Utjecaj gravitacijskog polja, iako postoji, toliko je malen da ga možemo zanemariti.

Omjer između promjera jezgre i atoma iznosi od 10^{-8} do 10^{-12} , pa za kretanje neutrona ima vrlo mnogo slobodnog prostora. Ali unatoč tome postoji stanovita vjerojatnost da neki neutron na svom putu naiđe na neku jezgru. Ta vjerojatnost mogla bi se odrediti kao omjer površine jezgre i slobodne površine, pa bi ona imala red veličine 10^{-24} . Eksperimenti, međutim, pokazuju da je ta vjerojatnost višestruko veća, što je posljedica djelovanja jezgara koje se nalaze na putu neutrona. Takvu površinu koja stvarno djeluje na neutron nazivamo *udarni presjek*, a označavamo je sa σ . Udarni presjek nije neka konstanta, jer ovisi o vrsti jezgre, o energiji neutrona i o vrsti reakcije između neutrona i jezgre. Jedan te isti neutron s jednom te istom energijom (brzinom) ima različite vrijednosti udarnog presjeka ovisno o tome je li riječ o nuklearnoj reakciji između neutrona i jezgre u obliku:

- raspada pogođene jezgre,
- apsorpciji neutrona od strane jezgre, ali bez raspada, ili
- sraza neutrona i pogođene jezgre.

Za definiranje udarnog presjeka neka posluži slika 2.3.



Slika 2.3. Skica za definiciju udarnog presjeka [1]

Pretpostavimo da s lijeve strane struji Φ_0 neutrona po cm^2 i u jednog sekundi okomito na graničnu površinu. Na toj površini ima N atoma po cm^2 . Jedan dio neutrona izazvat će u sudaru s jezgrama atoma u graničnom sloju nuklearnu reakciju, npr. raspad jezgre. Broj tako pogođenih jezgara C po cm^2 i u sekundi ($cm^{-2}s^{-1}$) ovisi o udarnom presjeku σ , o gustoći atoma N u graničnom sloju (cm^{-2}) i gustoći neutrona Φ_0 ($cm^{-2}s^{-1}$), pa se može postaviti da je:

$$C = \sigma N \Phi_0 \quad (2-2)$$

Prema (2-2) udarni presjek dobivamo iz relacije:

$$\sigma = \frac{C}{N \Phi_0} \left[\frac{cm^{-2}s^{-1}}{cm^{-2} cm^{-2}s^{-1}} = cm^2 \right] \quad (2-3)$$

Tako definirani udarni presjek naziva se *mikroskopski udarni presjek* i ima dimenziju cm^2 . Ta je jedinica za praktične račune prevelika, pa se upotrebljava jedinica $10^{-24} cm^2$, koja je nazvana 1 *barn*.

Ako se mjeri gustoća neutrona Φ_0 prije ulaska u sloj materijala debljine x , te gustoća neutrona na izlasku iz sloja, dolazi se do podataka pomoću kojih se određuje udarni presjek σ . Promatramo li cm^2 površine, u sloju debljine dx nalazi se $N_v dx$ jezgara, gdje je N_v broj jezgara u cm^3 , a smanjenje gustoće neutrona pri prolasku kroz sloj dx iznosi:

$$-d\Phi = \sigma N_v \Phi dx \quad (2-4)$$

Nakon integriranja u granicama od 0 do x , a uzevši u obzir da je za $x=0$ gustoća neutrona Φ_0 , dobiva se:

$$\ln \frac{\Phi_0}{\Phi} = \sigma N_v x \quad (2-5)$$

odakle se lako izračunava udarni presjek σ .

Valja naglasiti da udarni presjek znatno ovisi o energiji neutrona, pa uz podatak o udarnom presjeku treba uvijek navesti i energiju neutrona za koju on vrijedi.

Osim mikroskopskoga udarnog presjeka σ upotrebljava se i *makroskopski* (Σ), definiran kao produkt broja jezgara u cm^3 (N_v) i mikroskopskog udarnog presjeka σ , pa je:

$$\Sigma = \sigma N_v \quad [cm^{-1}] \quad (2-6)$$

Makroskopski udarni presjek uzima u obzir, čega nema kod mikroskopskoga udarnog presjeka, i makroskopska stanja, npr. tlak i temperaturu, o kojima npr. broj atoma plinova u cm^3 znatno ovisi. Pomoću makroskopskoga udarnog presjeka može se odrediti prosječna duljina slobodnog puta neutrona, koja je jednaka prosječnom putu što ga prijeđe neutron prije nego izazove neku od nuklearnih reakcija.

Prosječna duljina slobodnog puta l_s prema tome je jednaka recipročnoj vrijednosti makroskopskoga udarnog presjeka:

$$l_s = \frac{1}{\Sigma} \quad (2-7)$$

I udarni presjeci i duljina slobodnog puta ovise o tipu nuklearnih reakcija. Nuklearne reakcije važne za pojave u reaktoru, dakle apsorpcija neutrona, sraz neutrona s jezgrama atoma i raspad jezgre djelovanjem neutrona, nazivaju se neutronske reakcije. [2]

2.4. Faktor multiplikacije

Kao što je već spomenuto, faktor multiplikacije definiran je omjerom broja neutrona u dvije sukcesivne generacije (izraz 2-1). Svi, raspadom jezgre nuklearnog goriva oslobođeni neutroni neće izazvati nove raspade jezgara. Dio njih će se izgubiti apsorpcijom neutrona - bilo u nuklearnom gorivu, bilo u ostalim materijalima koji se nalaze u reaktoru, i bijegom neutrona iz jezgre reaktora.

S obzirom na to da se neutroni u reaktoru gube na dva načina (apsorpcijom u jezgri reaktora i bijegom iz reaktora), definiraju se dva različita faktora multiplikacije. Prvi se odnosi na umnožavanje neutrona u reaktoru beskonačnih dimenzija (k_∞), u kojem nema bijega neutrona. Drugi, efektivni faktor multiplikacije (k_{ef}) uzima u obzir i gubitak neutrona nastao bijegom neutrona iz reaktora konačnih dimenzija. Dakle, u stvarnom je reaktoru bijeg neutrona prisutan, što povećava gubitak neutrona, a time i smanjuje faktor multiplikacije.

Faktor bijega neutrona (L) daje odnos broja neutrona koji je preostao u procesu i broja neutrona koji bi bili prisutni zanemarenjem njihovog bijega iz sustava (tj. kada bi reaktor bio neizmjerljivo velik). Umnožak k_∞ s L daje efektivni faktor multiplikacije:

$$k_{ef} = k_\infty L \quad (2-8)$$

Uobičajeno je faktore bijega neutrona posebno računati za termičke neutrone (L_t), a posebno za brze neutrone, odnosno neutrone viših energija (L_b):

$$k_{ef} = k_\infty L_b L_t \quad (2-9)$$

Da bi se održala lančana reakcija, mora biti $k_\infty > 1$ jer su L_b i L_t manji od jedinice.

Tip reaktora kojim se postiže $k_\infty > 1$ može osigurati lančanu reakciju ako mu jezgra ima dovoljno velike dimenzije. Pretpostavi li se približno da je bijeg neutrona razmjernan površini A jezgre

reaktora i da je oslobađanje neutrona razmjerno volumenu V jezgre, zatim, ako računamo da je površina razmjerna kvadratu linearne dimenzije l^2 , a volumen proporcionalan l^3 , dobiva se:

$$\frac{A}{V} = K \cdot \frac{l^2}{l^3} = K \cdot \frac{1}{l} \quad (2-10)$$

Dakle, vjerojatnost bijega neutrona obrnuto je proporcionalna linearnoj dimenziji reaktora, pa će s povećanjem dimenzija reaktora bijeg neutrona biti manji.

2.5. Reaktivnost reaktora

Faktor multiplikacije k definira stanje reaktora. Budući da je k vrlo blizu jedinici, često se upotrebljava *višak faktora multiplikacije* definiran izrazom:

$$\Delta k = k - 1 \quad (2-11)$$

Nekad je pogodno računati s *reaktivnošću reaktora*, koja se dobiva iz relacije:

$$\rho = \frac{k-1}{k} = \frac{\Delta k}{k} \approx \Delta k \quad (2-12)$$

jer je faktor multiplikacije obično vrlo blizu jedinice.

Razlikujemo u osnovi tri stanja reaktora: *potkritično*, *kritično* i *natkritično* stanje. Ta su stanja određena vrijednostima faktora multiplikacije, njegova viška ili reaktivnošću reaktora, pa je

- reaktor potkritičan kad je $k < 1$, $\Delta k < 0$, $\rho < 0$
- reaktor kritičan kad je $k = 1$, $\Delta k = 0$, $\rho = 0$
- reaktor natkritičan kad je $k > 1$, $\Delta k > 0$, $\rho > 0$

Reaktor se mora izgraditi tako da ima stanovitu pozitivnu reaktivnost. To je prijeko potrebno da bi se reaktor mogao staviti u pogon i da bi se kompenzirale promjene reaktivnosti koje se pojavljuju za vrijeme pogona (utrošak goriva i dr.). Prema tome, reaktor treba imati „ugrađenu reaktivnost“. Također je potrebno omogućiti promjenu reaktivnosti, i to: $\Delta k > 0$ za stavljanje u pogon i povećanje snage, $\Delta k = 0$ za stacionarno stanje i $\Delta k < 0$ pri zaustavljanju reaktora i smanjenju snage. Mora, dakle, biti moguće kompenzirati dio ugrađene reaktivnosti kako bi se postigla željena reaktivnost. To se postiže uvlačenjem u reaktor štapova od materijala velikog udarnog presjeka apsorpcije (bor, kadmij).

Uobičajeno je da se ugrađeni višak faktora multiplikacije ili ugrađena reaktivnost definira za „hladni“ i „svježi“ reaktor.

Pod pojmom „hladni reaktor“ podrazumijeva se reaktor pri temperaturi od 20°C. Kad, naime, reaktor radi, povećava se njegova temperatura, što ima utjecaja na reaktivnost reaktora, pa će ona biti različita od one pri 20°C.

Pod pojmom „svježi reaktor“ podrazumijeva se reaktor u kojem se nalazi svježe gorivo, bez produkata raspada. Manja količina goriva i produkti raspada, naime, smanjuju ugrađenu reaktivnost reaktora.

Za vrijeme rada faktor multiplikacije se mijenja zbog utjecaja:

- zatrovanja reaktora,
- utroška goriva,
- proizvodnje novog goriva (konverzije) i
- temperature.

Neki od tih utjecaja povećavaju faktor multiplikacije, ali je ipak konačni njihov efekt, osobito poslije duljeg pogona reaktora, negativan, jer smanjuju faktor multiplikacije. Svi utjecaji, međutim, ne pojavljuju se istodobno. Utjecaj temperature očituje se odmah nakon opterećenja reaktora, a zatrovanje reaktora opaža se više sati ili dana poslije toga. Tek nakon više tjedana ili mjeseci bit će zapaženi utjecaj utroška goriva i proizvodnje novog goriva. Da bi se u pogonu mogli uzeti u obzir spomenuti utjecaji, mora se ugrađena reaktivnost, odnosno višak faktora multiplikacije kompenzirati. U početku rada svježeg reaktora ugrađeni višak reaktivnosti biti će kompenziran sustavom regulacije (kontrolnim štapovima od bora ili kadmija). U tijeku rada sustavom regulacije bit će potrebno sve manje kompenzirati višak faktora multiplikacije kako bi reaktor stalno bio kritičan. Takva kompenzacija bit će moguća samo dok se ne utroši sav višak ugrađene reaktivnosti, nakon čega valja u reaktor staviti svježe gorivo, odnosno zamijeniti dio gorivih elemenata novim elementima.

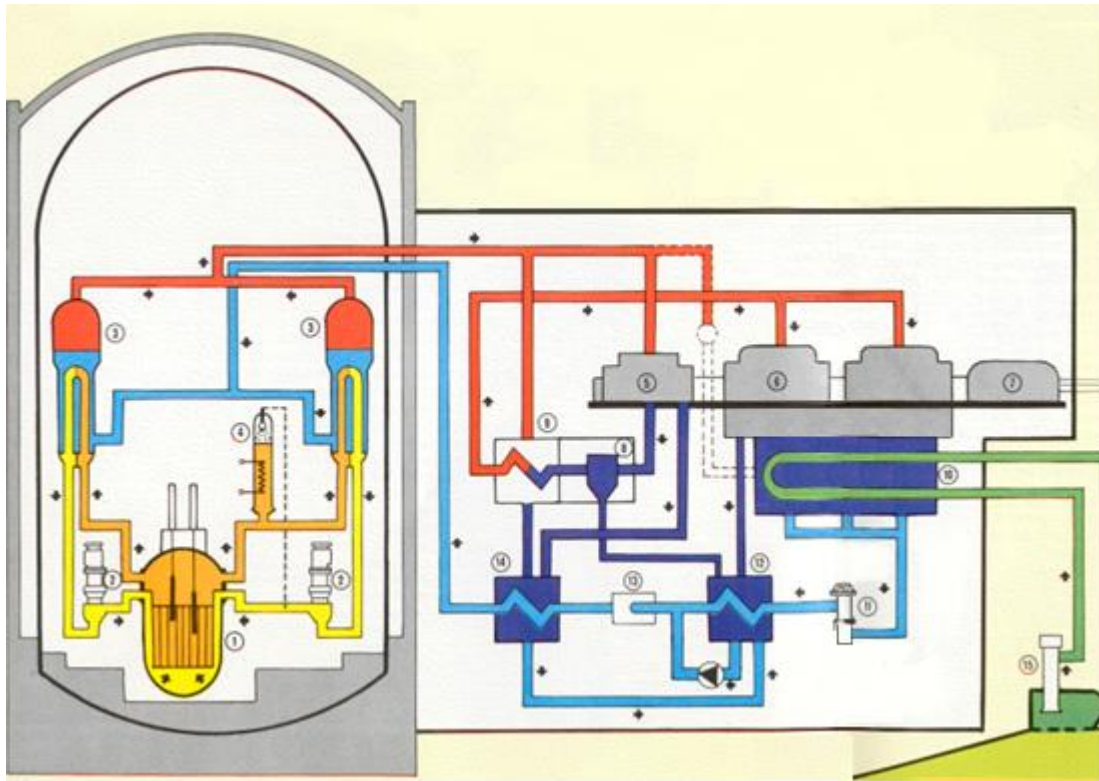
3. NUKLEARNE ELEKTRANE

3.1. Uvod

Nuklearne elektrane su postrojenja u kojima se toplinska energija koja se oslobađa u nuklearnim reaktorima prilikom raspada atoma nuklearnih goriva iskorištava za proizvodnju električne energije. Na taj način dobivena toplinska energija upotrebljava se, pri današnjem stanju razvoja tehnike, samo za stvaranje vodene pare kojom se tjeraju turboagregati.

U nuklearnoj elektrani termički proces u principu je isti kao u parnoj kondenzacijskoj termoelektrani. Novi je element reaktor, koji s obzirom na funkciju zamjenjuje ložište kotla (ako u krugu postoji izmjenjivač topline), odnosno parni kotao (ako se para iz reaktora dovodi neposredno u turbinu). Današnje velike nuklearne i termoelektrane koriste Rankine-ov kružni proces u kojem se proizvedena toplinska energija koristi za pretvorbu vode u vodenu paru visokog tlaka i temperature. Proizvedena para dolazi u turbinu gdje se energija vodene pare pretvara u mehanički rad koji pokreće osovinu turbine. Na osovinu turbine spojen je električni generator, kojem je zadaća da dovedenu mehaničku energiju turbine pretvori u električnu energiju koja se dalje prenosi u elektroenergetski sustav. Iz niskotlačnog dijela turbine vodena para odlazi u kondenzator u kojem ona opet pretvara u vodu koja se nakon toga opet odvodi u sustav za proizvodnju pare i ciklus se ponavlja. Kondenzatoru je potrebno hlađenje koje se postiže vodom (bilo protočnom ili iz jezera/mora) i/ili zrakom (rashladni tornjevi). Glavni dijelovi sustava za proizvodnju pare u NE su:

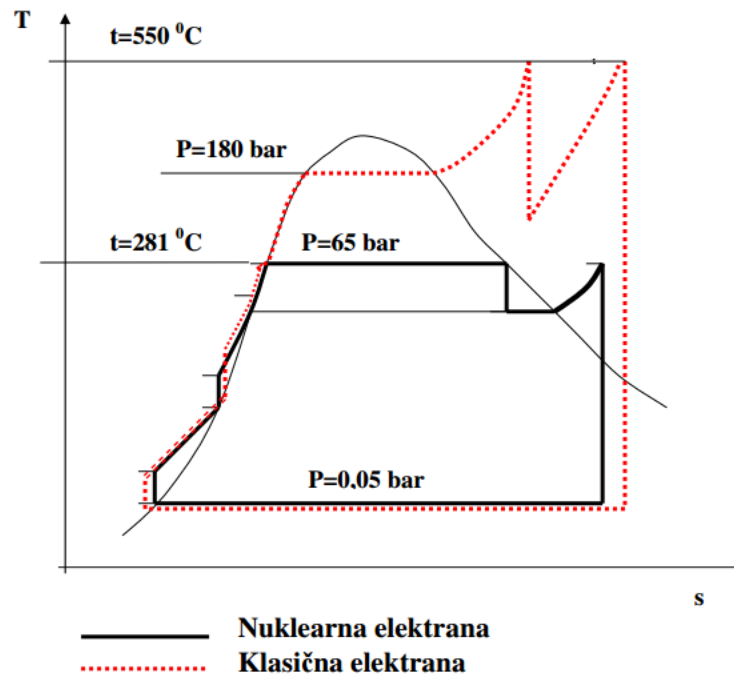
- Nuklearni reaktor,
- primarni rashladni krugovi koji sadrže pripadajuće primarne pumpe koje služe za protok rashladnog sredstva kroz reaktor,
- Izmjenjivači topline ili parogeneratori- njihove uloga je pretvorba rashladnog sredstva iz vodenog stanja u vodenu paru.



Slika 3.2. Shema nuklearne elektrane [5]

1-Reaktor, 2-Reaktorske rashladne pumpe, 3-Generatori pare, 4-Tlačna ekspanzijska posuda, 5-Visokotlačni dio turbine, 6-Niskotlačni dio turbine, 7-Generator el. energije, 8-Separator pare, 9-Pregrijač pare, 10-Kondenzator, 11-Pumpa kondenzata, 12-Niskotlačni predgrijač, 13-Napojne pumpe, 14-Visokotlačni predgrijač, 15-Pumpe rashladne vode

Stupanj djelovanja toplinskog ciklusa nuklearnih elektrana niži je nego kod modernih termoelektrana. Razlog tome je niža srednja temperatura rashladnog sredstva reaktora u nuklearnim elektranama u odnosu na temperaturu ložišta parnih kotlova TE-a. Temperatura rashladnog sredstva određena je temperaturom košuljice gorivnih štapova i maksimalnom temperaturom goriva. Visoka temperatura goriva dovodi do njegovog taljenja, a previsoka temperatura košuljice izaziva njeno mehaničko oštećenje i ispuštanje fisijskih produkata u rashladno sredstvo. [4]



Slika 3.3: Usporedba parnog procesa u nuklearnoj i klasičnoj elektrani

3.2. Nuklearni reaktor

Nuklearni reaktor je uređaj u kojem se zbiva kontrolirana lančana nuklearna reakcija. Svi današnji reaktori primjenjuju reakciju fisije, dok su reaktori bazirani na nuklearnoj fuzijskoj reakciji u fazi razvoja i njihova je realizacija za sada još upitna. Nuklearni reaktor sastoji se od reaktorske posude u kojoj se nalazi reaktorska jezgra s nuklearnim gorivom, moderator, reflektor, rashladno sredstvo i kontrolne šipke. U nuklearnom gorivu zbiva se nuklearna reakcija u kojoj se apsorpcijom neutrona jezgra fisibilnog nuklida raspada na dvije lakše jezgre i dva do tri brza neutrona. Pritom se raspadom svake fisibilne jezgre oslobađa energija od oko 200 MeV. Lančana fisijska reakcija može se ostvariti ako bar jedan od oslobođenih neutrona prouzroči novu fisiju u okolnim fisibilnim jezgrama. [4]

Toplinska energija dobiva se fisijom jezgara odgovarajućih goriva. Kao gorivo koriste se uran U-235 i plutonij Pu-239. U reaktoru se samo izotop urana U-235 raspada, dok mnogo češći U-238 ne. Kao što je već rečeno, prirodni uran sadrži samo 0,7 % raspadljivog urana U-235, dok je 99,3 % neraspadljiv U-238. Većina tipova reaktora – posebno tzv. lakovodni reaktori – zahtijevaju obogaćeni uran s 1 – 10 % U-235. To se postiže obradom prirodnog urana u specijalnim postrojenjima za obogaćivanje. I Pu-239 se može koristiti kao gorivo, a nastaje između ostalog i

ozračenjem U-238 neutronima određene brzine. Gorivo se - prešano u tablete - ulaže u cijevi od cirkonija, koje se sastavljaju u gorive elemente. Veliki broj tih elemenata stvara jezgru reaktora. Da bi se spriječio bijeg neutrona iz jezgre, ona je opkoljena reflektorom, a da bi se onemogućio prodor radioaktivnog zračenja u okolinu, oko reflektora je biološki štit (to je betonski zid debljine i nekoliko metara). Regulacija snage reaktora postiže se kontrolnim sustavom. To su štapovi za regulaciju koji se uvode u jezgru reaktora. Oni apsorbiraju neutrone, uslijed čega se broj raspada jezgara u sklopu lančane reakcije, a time i proizvodnja topline, smanjuje. Položaj štapova za reguliranje određuje dakle snagu reaktora. Kod isključenja reaktora štapovi se potpuno uvlače u jezgru i time se obustavlja lančana reakcija. Kao sigurnosni sustav koriste se rezervni istovrsni štapovi.

Da bi se pri fisiji dobio kontrolirani tok lančane reakcije, potrebno je usporiti novo nastale neutrone, jer su oni u stanju izazvati nove raspade jezgara samo pri malim brzinama. Funkciju usporavanja neutrona preuzima moderator. Reaktori u kojima fisije uglavnom izazivaju neutroni u termičkom području od $E_n \leq 0,625$ eV nazivaju se termički reaktori. Takvi reaktori koriste moderator za usporenje neutrona. Reaktori bez moderatora, gdje fisiju izazivaju neutroni energije između nekoliko MeV-a do ispod keV-a, nazivaju se brzi reaktori. Današnji reaktori su uglavnom heterogenog tipa, odnosno gorivo, moderator i rashladno sredstvo fizički su odvojeni jedno od drugog. Ako je gorivo pomiješano s moderatorom i rashladnim sredstvom onda se radi o reaktoru homogenog tipa. Kao moderator koristi se voda, grafit, teška voda, organske tekućine i rastaljene soli. [9]

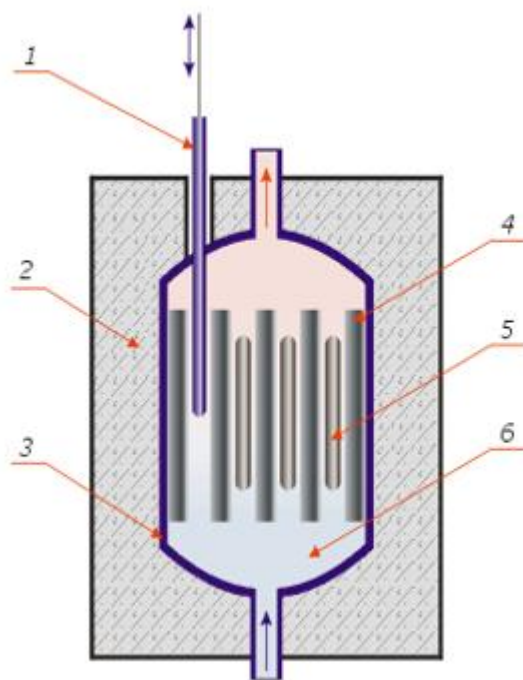
Rashladno sredstvo struji kroz gorive elemente u jezgri reaktora te preuzima direktnim dodiranjem toplinu proizvedenu u njima. Pri isključenju reaktora mora se osigurati da se toplina koja nastaje naknadnom fisijom može odvesti daljnjim održavanjem toka rashladnog sredstva, jer bi inače došlo do pregrijanja jezgre. Kao rashladno sredstvo koriste se: obična voda, teška voda (obje pod tlakom ili s isparivanjem u reaktoru), organske tekućine, rastaljeni laki metali (natrij, smjesa natrija i kalija), rastaljene soli, te plinovi (zrak, ugljik-dioksid, helij).

Odvođenje topline običnom vodom ima znatne prednosti (mogućnost i iskustvo pripreme vode, visoki koeficijent prijelaza topline), ali i nedostataka. Ako se kao rashladni medij upotrebljava voda, koja je istovremeno i moderator, ne može se kao fisioni materijal upotrijebiti prirodni uran (zbog velikog udarnog presjeka apsorpcije vode), a za postizanje visokih temperatura potrebno je raditi pod visokim tlakovima. Upotreba rashladnih sredstava malog udarnog presjeka apsorpcije smanjuje potrebu da se uran obogaćuje i omogućuje bolje iskorištenje goriva. Samo s rashladnim sredstvima koja imaju mali udarni presjek apsorpcije (npr. ugljik-dioksid, teška voda i helij) može

se ostvariti reaktor s prirodnim uranom. Ostala rashladna sredstva uvjetuju upotrebu obogaćenog urana.

Posebnu pažnju treba posvetiti pripremi vode, jer nečistoće u vodi mogu postati znatno radioaktivne. Ugljični dioksid je pogodan za odvođenje topline iz reaktora zbog njegovih povoljnih nuklearnih karakteristika, relativno velikog koeficijenta prijelaza topline i zbog njegove kemijske stabilnosti. Ugljični dioksid ne postaje radioaktivan prilikom prolaza kroz reaktor što pojednostavljuje izvedbu. Osim toga ne postoje problemi korozije. Organska rashladna sredstva nisu koroziva ako je sadržaj vode u određenim granicama, a ako sadrže samo vodik i ugljik, ne postaju znatnije radioaktivna kad u njima nema nečistoća koje mogu biti izvor intenzivne radioaktivnosti. Mogućnost rada s visokim temperaturama uz male tlakove, kao i visoki koeficijent prijelaza topline, doveli su do upotrebe rastaljenih lakih metala kao medija za odvođenje topline iz reaktora.

Za pogon turbine služi pogonsko sredstvo. Kod rektorskih kružnih tokova bez izmjenjivača topline (reaktori s kipućom vodom i visokotemperaturni plinom hlađeni reaktori) pogonsko i rashladno sredstvo su identični. Na slici 3.4 je prikazan shematski prikaz nuklearnog reaktora.



Slika 3.4. Shematski prikaz nuklearnog reaktora: 1 – kontrolne šipke, 2 – biološka zaštita, 3 – zaštita, 4 – moderator neutrona, 5 – nuklearno gorivo, 6 – toplinski spremnik

3.3. Podjela nuklearnih reaktora

Razvijeni su i još se razvijaju brojni tipovi termičkih reaktora. Kao što smo već spomenuli glavne komponente jezgre nuklearnog reaktora su gorivo, moderator, rashladno sredstvo te kontrolne šipke. Glavna razlika pojedinih tipova reaktora ovisi o izboru materijala tih komponenti.

S obzirom na nuklearno gorivo dva su osnovna tipa termičkih reaktora: reaktori s prirodnim uranom i reaktori s malo obogaćenim uranom (između 1 i 10%). U tablici 3.1. prikazane su moguće kombinacije moderatora i rashladnog sredstva u reaktorima s prirodnim i obogaćenim uranom. Iz spomenute tablice može se zaključiti da nije moguće izvedba reaktora s prirodnim uranom i običnom vodom kao moderatorom zbog velikog udarnog presjeka apsorpcije (σ_a) obične vode. Građeni su reaktori s prirodnim uranom i to u različitim kombinacijama moderatora i rashladnog sredstva: grafit-obična voda, grafit-ugljik-dioksid, teška voda-teška voda, teška voda-ugljik-dioksid.

Tablica 3.1. Mogući tipovi termičkih reaktora

	Prirodni uran	Obogaćeni uran (1-10% U-235)
Moderator	grafit, teška voda	grafit, obična voda
Rashladni medij	ugljik-dioksid, teška voda, obična voda, organski spojevi	ugljik-dioksid, helij, obična voda,organski spojevi rastaljene soli

Moderatori koji se koriste u termičkim reaktorima služe za usporavanje neutrona. S obzirom da neutron najviše energije gubi prilikom sudara s lakim jezgrama, izbor materijala i nije previše velik. Materijal mora imati visoku sposobnost moderacije, ne smije imati velik udarni presjek za apsorpciju neutrona, mora biti jeftin i ne smije biti toksičan. Najčešće se koriste voda, teška voda i grafit. Od navedenih materijala obična voda (H_2O) ima najveću sposobnost usporavanja neutrona, ali, po kvaliteti moderacije najbolji izbor je teška voda (D_2O) zbog bitno manjeg udarnog presjeka za apsorpciju neutrona, što omogućava čak i uporabu prirodnog urana za nuklearno gorivo.

Najveći nedostatak teške vode je visoka cijena proizvodnje. Prema materijalu moderatora reaktori se dijele na:

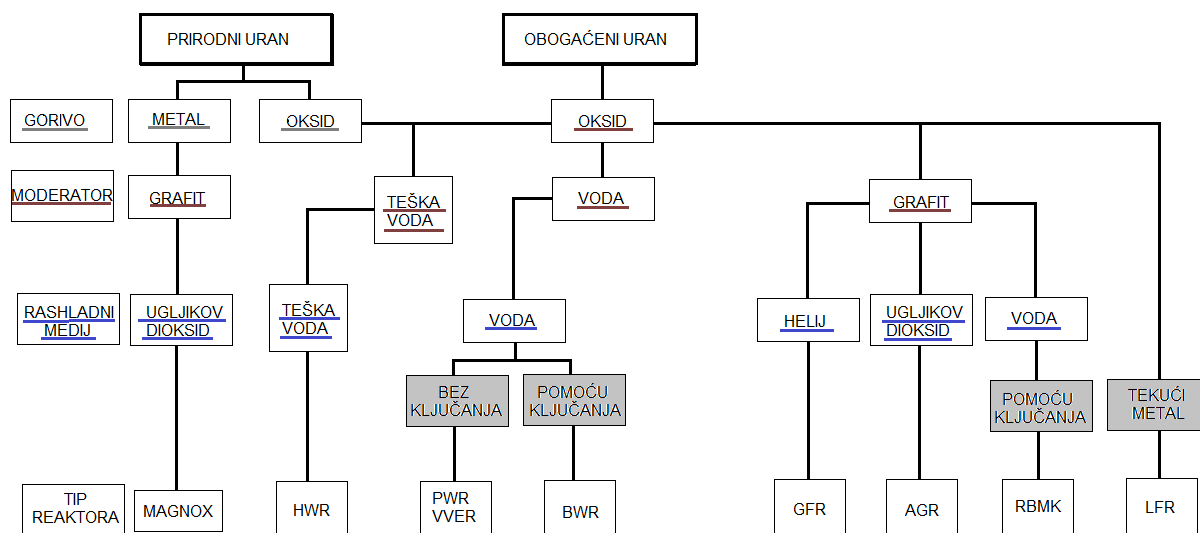
- grafitom moderirane reaktore,
- vodom moderirane reaktore,

- teškom vodom moderirane reaktore,
- lakim elementima moderirane reaktore,
- organskim materijalima moderirane reaktore.

Rashladno sredstvo u elektranama služi za prijenos energije od goriva do turbine, bilo izravno ili posredno. Rashladno sredstvo može biti tekućina ili plin. U termičkim reaktorima najčešće se koriste voda, teška voda, ugljikov dioksid i helij, dok se u brzim reaktorima koriste tekući metali. Prema korištenom rashladnom sredstvu reaktori se dijele na:

- reaktore hladene plinom GCR (eng. –Gas Cooled Reactor),
- brze reaktore hladene plinom GFR (eng. – Gas-cooled Fast Reactor),
- napredne reaktore hladene plinom AGR (eng. – Advanced Gas Reactor),
- reaktore hladene običnom vodom LWR (eng. – Light Water Reactor),
- reaktore s tlakovodnim hlađenjem PWR (eng. – Pressurized Water Reactor),
- reaktore s ključajućom vodom BWR (eng. – Boiling Water Reactor),
- reaktore hladene i moderirane teškom vodom HWR (eng. – Heavy Water Reactor),
- reaktore hladene vodom i moderirane grafitom LWGR (eng. – Light Water Cooled Graphite-moderated Reactor)
- visokotemperaturne reaktore HTGR (eng. High Temperature Gas Reactor) hladene tekućim metalom,
- brze reaktore hladene natrijem SFR (eng. – Sodium-cooled Fast Reactor),
- brze reaktore hladene olovom LFR (eng. – Lead-cooled Fast Reactor),
- brze reaktore hladene s rastaljenim solima MSR (eng. – Molten Salt Reactor).

Pregled tipova nuklearnih energetske reaktora, nuklearnog goriva, moderatora i rashladnih sredstava (hladila), shematski su prikazani na slici 3.5.



Slika 3.5. Shematski prikaz reaktora, vrste goriva, moderatora i rashladnog sredstva

Ostala podjela nuklearnih elektrana je prema projektnim karakteristikama odnosno prema vremenu ulaska u komercijalni pogon u 4 generacije:

- I. Generacija uključuje prototipna postrojenja koja su u pogon ulazila pedesetih godina 20. stoljeća
- II. Generacija nuklearnih elektrana u pogonu sve do početka 21. stoljeća (tu pripada i NE Krško)
- III. Generacija nuklearnih elektrana su postrojenja napredne izvedbe koja koriste poboljšanja postojeće tehnologije za veću sigurnost i ekonomičnost (standardizacijom, pojednostavljenjem, bolja rješenja, veći odgor goriva) III+ generacija je korak dalje (dodatna poboljšanja, modularnost i pouzdanost)
- IV. Generacija elektrana je napredna u pogledu sigurnosti i tipu reaktora (npr. visokotemperaturni, oplodni, itd.), nakon 2030. [3]

Prva generacija nuklearnih reaktora služila je za istraživanje, a današnji reaktori zapravo predstavljaju tu prvu generaciju, poboljšanu za komercijalno korištenje. Imaju sigurnosne sustave koji trebaju spriječiti topljenje jezgre reaktora, ili propuštanje radioaktivnih tvari u prirodu.

Nuklearni reaktori II. generacije razvili su se iz svojih prethodnika. Za taj razvoj trebalo je proći čitavih 30 godina, sve do sredine 90-ih godina prošlog stoljeća. Promjene u dizajnu bile su značajne, ali ipak ne u cijelosti revolucionarne.

U daljnjim poglavljima biti će detaljnije opisane napredne tehnologije nuklearnih reaktora.

4. NAPREDNE TEHNOLOGIJE NUKLEARNIH REAKTORA

4.1. Reaktori treće generacije

Reaktori III. generacije nastali su poboljšanjem dizajna II generacije reaktora. Pobošaljnja dizajna rezultiraju manjim troškovima te kraćim vremenom izgradnje. Također poboljšanja su vidljiva i u upravljanju koje je olakšano te su manje osjetljiviji na kvarove. Radni vijek produžen je za 60 godina. Uz povećanu raspoloživost postrojenja, smanjena je vjerojatnost taljenja jezgre i povećana je otpornost na ozbiljna oštećenja uzrokovana čak i udarom aviona. Uporaba novih sagorivih apsorbira produžava duljinu ciklusa, a visoki odgor goriva reducira potrebe za gorivom i količinu otpada. Ipak, najveći odmak od prethodne generacije je ugradnja pasivnih sigurnosnih sustava čije se djelovanje oslanja na gravitaciju, prirodnu konvekciju i uskladištenu energiju, a ne na komponente ovisne o vanjskim naponskim izvorima. Potrebna električna energija dobiva se iz akumulatora te je potrebna za signalizaciju i upravljanje magnetskim ventilima.

Reaktori koji pripadaju III. generaciji su:

- EPR - Europski tlačni reaktor (engl. European Pressurized Reactor) – Areva
- APWR - Usavršeni tlačni reaktor (engl. Advanced Pressurized Water Reactor) – Mitsubishi i Westinghouse
- AP1000 - Usavršeni pasivni reaktor (engl. Advanced Passive) – Westinghouse
- IRIS (engl. International Reactor Inovative and Secure) – Westinghouse VVER-1200/V-491 – Rosatom (Rusija)
- APR-1400 – Usavršeni reaktor s vodom pod pritiskom – (engl. Advanced Pressurized Water Reactor) – Dosam (Južna Koreja)
- ESBWR - Ekonomični pojednostavljeni reaktor s kipućom vodom – (engl. Economic Simplified Boiling Water Reactor) – GE i Hitachi
- ABWR – Usavršeni reaktor s kipućom vodom – GE, Toshiba i Hitachi
- ACR-1000 - Usavršeni teškovodni reaktor s cijevima pod tlakom – AECL

4.1.1. Europski tlačni reaktor (EPR)

Europski reaktor s tlakovodnim hlađenjem EPR (eng.- European Pressurized Reactor) jedini je reaktor ove generacije čija je gradnja započela u Europi. Predviđena snaga je 1600 MW. U

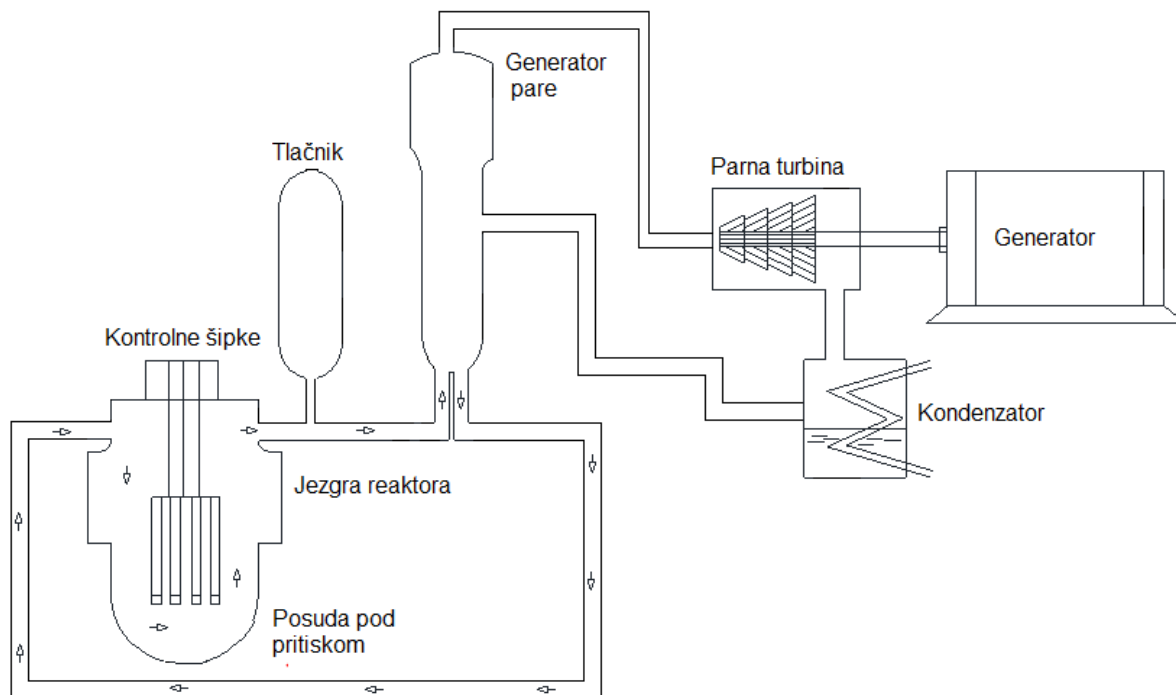
izgradnji dva takva reaktora, jedan u Francuskoj Flamanville i u Finskoj Olkiluoto. Troškovi izgradnje postojenja su oko 3,3 i 3,7 milijardi eura, a trajanje izgradnje je oko 54 mjeseca. Za sada se planira izgradnja 16 ovakvih reaktora, a od toga sedam je predviđeno u SAD-u. Reaktor je nastao na osnovi PWR reaktora. Gorivni elementi imaju kvadratni presjek u matrici 17×17 , duljine 420cm te ih je ukupno 241. Predviđa se rad u 18 ili 24-mjesečnom ciklusu.

Kao sagorivni apsorber koristiti će se gadolinij (Gd_2O_3), kako bi se kompezirao višak reaktivnosti na početku ciklosa rada moderatoru se dodaje borna kiselina. Gorivo koje će se koristiti je do 5% obogaćeni ^{235}U , s opcijom korištenja MOX goriva. Predviđeni srednji otpusni odgor je 60GWd/tU. Kontrolni štapovi izrađeni su od dva različita materijala: donji dio štapa (dužine 1,50 m) izrađen je od legure srebra, indija i kadmija a gornji dio štapa (2,61 m dužine) BC. Broj elemenata koji sadrže kontrolne štapove je 89. Ovaj reaktor ima čelični reflektor koji ima ulogu smanjiti bijeg neutrona iz jezgre te također štiti reaktorsku posudu od neutronske toke. Reaktor ima 4 rashladna kruga koji se sastoje od 4 cirkulacijske pumpe i 4 parogeneratore te svaki ima težinu od 500 t te se po jedan nalazi u rashladnom krugu. Predviđeni radni vijek europskog tlačnog reaktora je 60 godina. Jedna od najvažnijih prednosti i poboljšanja ovog reaktora u odnosu na obični reaktor s tlakovodnim hlađenjem je povećana redundancija¹ i odvojenost sustava. Instalirana su 4 neovisna sustava za zaštitno hlađenje jezgre, te svaki od njih može sam hladiti jezgru nakon obustave rada reaktora, čime je redundancija višestruko ostvarena. Također smanjena je vjerojatnost oštećenja, vjerojatnost ispuštanja radioaktivnih tvari i posljedica koje rezultiraju iz toga, te je time smanjena vjerojatnost početnih nezgoda. Smanjena je i vjerojatnost teških kvarova i posljedica istih u slučaju topljenja jezgre ili narušavanja integriteta reaktorske posude, jer je povećana robusnost kontejnmenta. Uloga dvostrukog betonskog zida ukupne debljine 2,6 m je zaštita kritičnih sustava od utjecaja vanjskih događaja. Zid može izdržati nadtlak u slučaju nezgode ili udara aviona. Postavljanjem većih parnih generatora i tlačnika² produženo je vrijeme potrebno za reagiranje operatera u slučaju kvarova ili prolaznih pojava. Ostvarena je i manja osjetljivost na ljudske pogreške korištenjem digitaliziranog sustava instrumentacije i kontrole te korištenjem najnovijih informacijskih sustava, pojednostavljenjem sigurnosnih sustava i funkcionalnom odvojenošću. Pogreške koje se odnose na zajednički način rada eliminirane su fizičkom

¹ Višestruko projektiranje sigurnosno važnih tehničkih sustava (npr. tehnički sustav napajanja električnom energijom u nuklearnoj elektrani realiziran je zbog poboljšane sigurnosti korištenjem većeg broja dizel generatora od potrebnog broja za normalan rad sustava)

² Tlačnik (tlačni spremnik) je posuda priključena na primarni krug nuklearne elektrane sa svrhom da se u njemu održava potreban tlak i da kompenzira promjenu obujma reaktorskog rashladnog sredstva zbog promjene temperature. Tlačni spremnik je zatvorena cilindrična posuda u kojoj su električna grijala određene snage

odvojenošću i primjenom različitih podrški za pojedinu sigurnosnu funkciju. Primjer jednog takvog reaktora prikazan je na slici 4.1. [4]

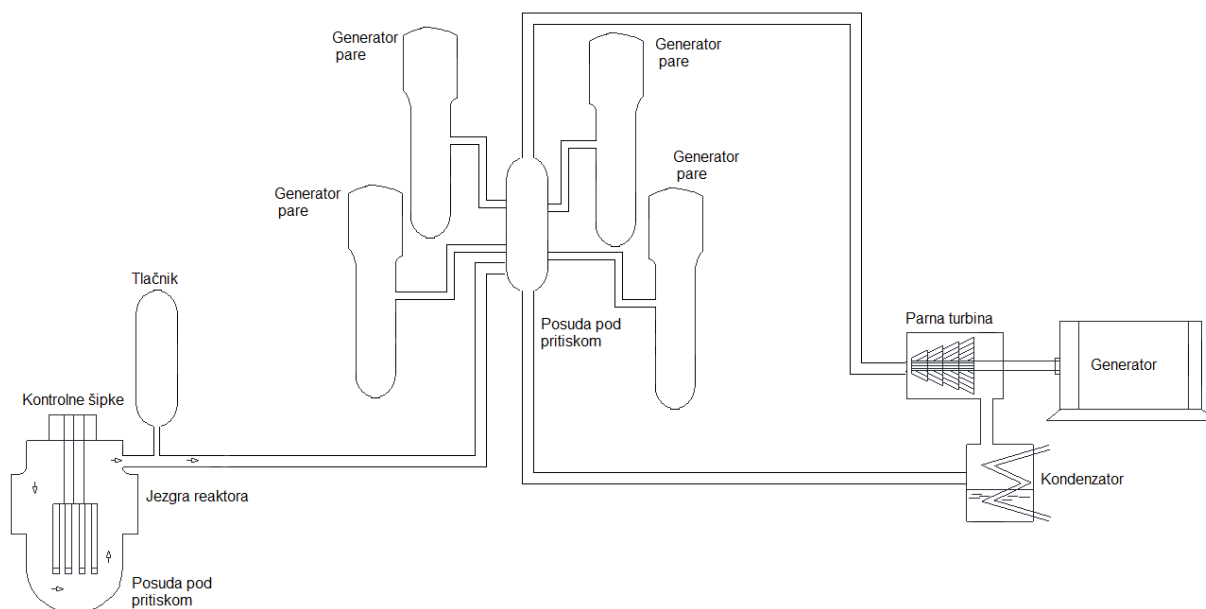


Slika 4.1. Europski tlačni reaktor [4]

4.1.2. Usavršeni tlačni reaktor (APWR)

Usavršeni tlačni reaktor (eng.- Advanced Pressurized-Water Reactor) je napredni reaktor na bazi japanskih PWR-a. Posjeduje četiri rashladna kruga u ovisnosti o tržištu kojemu je namijenjen. Dolazi u dvije izvedbe sa snagom reaktora od 1538 MWe ili 1700 MWe. US-APWR dizajn je pojednostavljeni dizajn koji povećava zalihost i neovisnost sustava. Novi sustav akumulatora visokih performansi koristi se u dizajnu sustava hlađenja u hitnim situacijama. Uključuje funkcije oba tradicionalna akumulatora i niskotlačnih crpki za ubrizgavanje. US-APWR zamjenjuje tradicionalne dizelske generatore s pouzdanim, zrakom hlađenim generatorima plinske turbine s brzim pokretanjem. Time se osigurava neposredna rezervna snaga u sustavima za sigurnost i hlađenje u nezgode ili drugih ozbiljnih nesreća. Svi su sustavi opsežno testirani i provjereni u poslovnim postrojenjima u Japanu. [5] Dizajn u potpunosti zadovoljava sve zahtjeve nakon Fukushima. Rashladno sredstvo (voda pod tlakom) oduzima toplinu reaktoru odlazi u izmjenjivač topline gdje predaje oduzetu toplinu sekundarnom krugu te nastaje zasićena para. Voda u

primarnom krugu cijelo vrijeme kruži (cirkulira) i hladi reaktor za što je zadužena pumpa. Para pokreće parnu turbinu koja je preko osovine povezana sa električnim generatorom. Na izlazu iz turbine para obavlja mehanički rad, hladi se, te postaje voda. Voda nakon izlaska iz parne turbine dodatno se hladi u kondenzatoru nakon čega se odvodi u napojnu pumpu te se ciklus ponavlja.



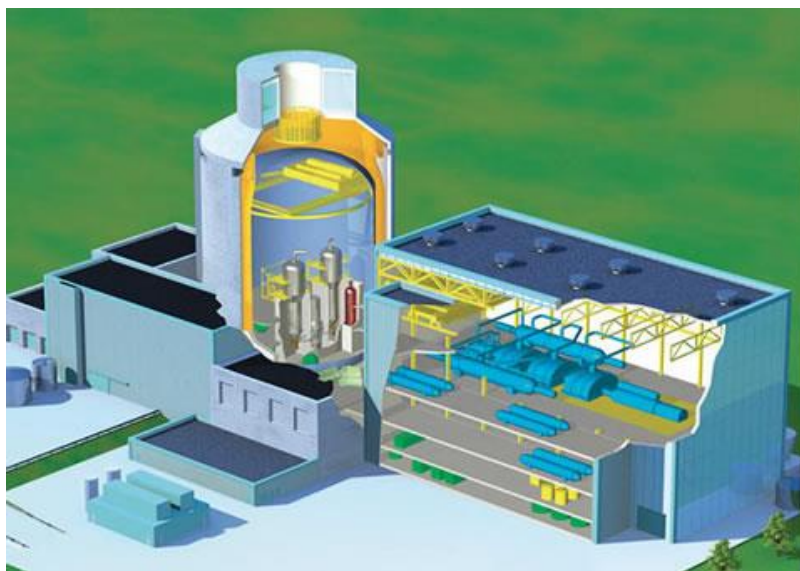
Slika 4.2. Usavršeni tlačni reaktor [6]

4.1.3. Usavršeni pasivni reaktor (AP1000)

Usavršeni pasivni reaktor (engl. Advanced Passive) je poboljšana verzija PWR reaktora, snage 1117 MWe – 1154 MWe. Planirana je izgradnja 14 reaktora, no sklopljena su samo 4 ugovora za gradnju. Neka od poboljšanja ovog reaktora vidljiva su u pojednostavljenju s manje komponentata, povećan je nivo sigurnosti upotrebom pasivnih sustava koji nema potporu naponske mreže, koristi se modularna konstrukcija čime je skraćeno vrijeme izgradnje, smanjeni su troškovi pogona i održavanja, pouzdan i siguran rad osiguran je ugradnjom sigurnosnih granica (niža gustoća snage na kojoj reaktor radi) te niži investicijski troškovi postrojenja rezultiraju nižom proizvodnjom el. energije.

Ova poboljšanja nisu potpuno neovisna jedna o drugoj. Pojednostavljenja kao upotreba pasivnih sigurnosnih sistema umjesto tradicionalnih aktivnih sistema (aktivni sistem za zaštitno hlađenje jezgre, sistem za odvođenje ostatne topline) rezultira prestankom korištenja pomoćnih sustavima koji su bili potrebni za njihovu funkcionalnost. S tim je eliminirano i obavezno osiguranje napajanja pomoćnih sustava iz izmjenične naponske mreže, osiguravanja rashladne vode, grijanje

ventilacija i klimatizacija. Izostankom aktivnih sustava prestaje potreba i za njihovom redundancijom koja je potrebna zbog zahtijevane visoke pouzdanosti tih sustava. Pasivni sustavi za razliku od aktivnih, nalaze se unutar zaštitne zgrade. Pasivni sustav za hlađenje oslanja se na gravitacijom uzrokovano pražnjenje bazena, zračno hlađenje prirodnom konvekcijom, gdje se uz pomoć posebno oblikovanih vodilica stvara jako strujanje uz posudu, te isparavanje vode. Sustavi su projektirani tako da ne zahtijevaju intervenciju operatera tijekom 72 sata. Pojednostavljenje u primarnom krugu odnosi se na izvedbe parogeneratorske. Primarni krug sastoji se od dvije pumpe i jednog parogeneratorske koji čine jednu mehaničku cjelinu. Reaktor ima ukupno 2 rashladna kruga. Time je izostavljen cjevovod između parogeneratorske i pumpe te zasebna potporna konstrukcija pumpe. Pumpe su zatvorene izvedbe što pridonosi sigurnosti pogona jer ne može doći do istjecanja rashladnog sredstva uz osovinu niti postoji mogućnost curenja iz primarnog kruga zbog degradacije brtvi na osovini. Upotrebom tzv. „sivih“ kontrolnih štapova u normalnom pogonu smanjuje se potreba za boriranjem/deboriranjem jezgre što olakšava rad i pojednostavljuje sustav volumne i kemijske kontrole. Usavršeni pasivni reaktor u odnosu na klasični PWR ima 50% manje sigurnosnih ventila, 35% manje sigurnosnih pumpi, 80% manje cijevi. Međutim, sigurnost nije narušena [4].



Slika 4.3. Usavršeni pasivni reaktor (AP1000), [6]

4.1.4. IRIS – „Inovativni i sigurni međunarodni reaktor“

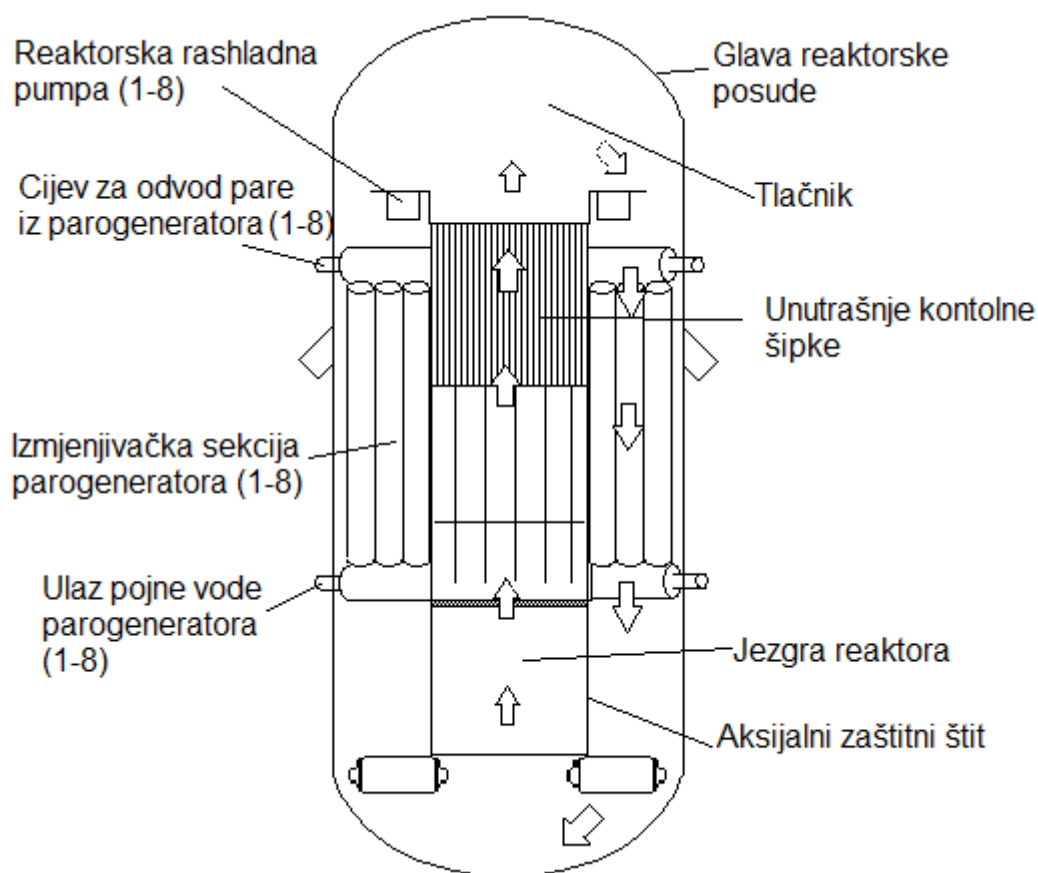
IRIS reaktor (engl. International Reactor Innovative and Secure) je također poboljšana verzija PWR reaktora. Projekt je započeo prije 10 godina pod vodstvom Westinghousea, a u njemu uz dvadeset instituta i sveučilišta iz svijeta sudjeluje i FER Zagreb. Reaktor ima snagu 335 MWe, te se predviđa se izgradnja jednog ili više modula. Glavne osobine IRIS-a su:

- integralni raspored komponenata primarnog kruga,
- 48-mjesečni radni ciklus,
- čelični reflektor i
- takozvani „Safety-by-Design“ način projektiranja (dizajna) radi osiguranja sigurnosti – projektom (dizajnom) se isključuje vjerojatnost pojave neke nezgode.

Reaktor je manje snage, no reaktorska posuda³ visoka je 21,3 m, a njezin je promjer 6,2 m. Unutar reaktorske posude nalaze se parogeneratori, cirkulacijske pumpe, jezgra reaktora i kontrolni štapovi s pogonskim mehanizmom. S time je smanjena veličina postrojenja te tako pozitivno djeluje na sigurnost i ekonomičnost. Prednost integralnog reaktora je u eliminaciji primarnih cjevovoda čime nestaje opasnost od posljedica njihovog loma, a olakšano je i hlađenje jezgre prirodnom cirkulacijom. Jezgra IRIS reaktora duža je od standardne PWR jezgre, a sastoji se od 89 gorivnih elemenata. Svaki gorivni element je standardni Westinghouseova gorivni element kvadratnog presjeka (matrica 17×17) s tim da napravljene studije za različite odnose moderator/gorivo i različita obogaćenja pokazuju da je moguć odgor od 80 GWd/tU. No postizanje tolike količine odgora i korištenje većeg obogaćenja za sada ostaju opcija za budućnost jer nisu dozvoljeni. Parogeneratori IRIS reaktora helikoidalnog su tipa. Svaki reaktor sastoji se od ukupno 8 helikoidalnih parogeneratora sa 656 cijevi. U ovoj izvedbi se unutar cijevi nalazi primarno rashladno sredstvo, dok se sekundarno nalazi unutar cijevi. Pumpe su potopljene u primarni rashladni krug unutar reaktorske posude, te se razlikuju od onih kod klasičnog PWR-a. Drugačijeg su tipa, propelerskog, a karakterizira ih rad na temperaturama do 500°C, imaju velik protok, te mali porast tlaka. „Safety-by-Design“ načinom projektiranja uklonjena je potreba za sigurnosnim sustavima jer su uklonjene mogućnosti za nastanak niza nezgoda. Također je smanjena pojava ostalih nesretnih scenarija. Najveći kvar koji se može dogoditi PWR-a, puknuće glavnog cjevovoda eliminirano je jer se primarni rashladni krug nalazi unutar reaktorske posude. U slučaju nezgode, potrebno je veće vremensko razdoblje za grijanje ili hlađenje rashladnog sredstva zbog

³ Cilindrična posuda debelih stijenki koja okružuje jezgru reaktora nuklearne elektrane. Izvedba ovi o tipu nuklearnog reaktora. Kod tlakovodnog reaktora (PWR) i reaktora s kipucom vodom izrađuje se od nehrđajućeg čelika (tlačna posuda). Kod reaktora hlađenih plinom izrađuje se od betona.

veće veličina posude i veća količina vode u njoj. Visinska razlika između jezgre i parogeneratorske cijevi omogućava prirodnu cirkulaciju u slučaju ispada cirkulacijskih pumpi, a velik broj parogeneratorskih i pumpi predstavlja visoku redundanciju i umanjuje posljedice ispada bilo koje od tih komponenata. Povećana sigurnost, ekonomičnost i pouzdanost osigurani su cjelokupnim dizajnom IRIS-a koji se temelji na uklanjanju mogućnosti pojave nekih kvarova te je time pojednostavljena sigurnost sustava. Naravno da nije moguće ukloniti sve uzroke pojave nesreća, ali je moguće smanjiti njihove posljedice ako do njih dođe. To se postiže inherentnim svojstvima reaktora i upotrebom pasivnih sustava. Pod pojmom „pasivni sustav“ smatra se osiguranje zaštitnih barijera koje ne ovise o električki pokretanim komponentama nego o djelovanju uvijek prisutnih sila (gravitacija), uskladištenoj energiji (komprimirani plin, akumulatorske baterije) i pasivnih mehaničkih komponenata (nepovratni ventili) [4]. Treba napomenuti da od svih naprednih reaktora IRIS osigurava najmanju učestalost oštećenja jezgre.

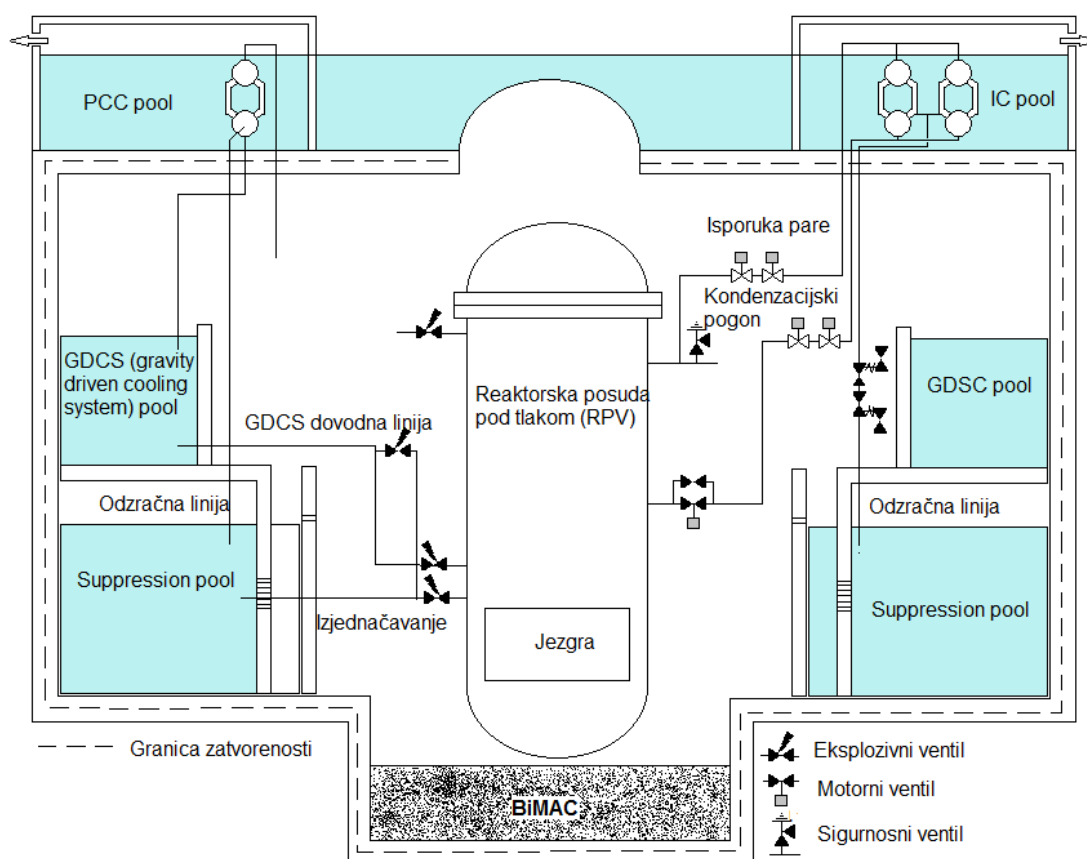


Slika 4.4. IRIS reaktor [8]

4.1.5. Ekonomični pojednostavljeni reaktor s kipućom vodom (ESBWR)

ESBWR (engl. Economic Simplified Boiling Water Reactor) predstavlja poboljšani dizajn u odnosu na ABWR reaktor. Poboljšanjem dizajnapovećana je sigurnost, izvrsna ekonomika i povećana je raspoloživost. Broj pumpi, ventila i motora smanjen je za četvrtinu u odnosu na ABWR, 11 sustava uklonjeno je u odnosu na prethodni dizajn, a ostatna⁴ toplina može se odvoditi direktno u atmosferu. Broj aktivnih komponenti reducira se pasivnim sistemom hlađenja čime je povećan doprinos sigurnosti. Ostali pasivni sustavu i komponente koje je potrebno spomenuti kod ovog reaktora su izolacijski kondenzatori i sustav za zaštitno hlađenje jezgre. Vrijeme koje je potrebno za izgradnju elektrane koja bi imala snagu od 1590 MWe je 42 mjeseca, čemu doprinosi korištenje standardiziranih modula. Elektrana s ESBWR reaktorom koristi provjerene karakteristike BWR-a, kao upotreba izolacijskih kondenzatora. No najveća razlika od ostalih vrsta je u upotrebi pasivnih sistema za zaštitu i prestanak korištenja recirkulacijskih pumpi, jer se protok fluida kroz jezgru obavlja prirodnom cirkulacijom. Kako bi se povećala prirodna cirkulacija potrebno je izraditi veću reaktorsku posudu (27,7 m) te su se time postigle i ostale prednosti. Neke od prednosti su što povećanjem količine vode iznad jezgre produljilo vrijeme do otkrivanja u slučaju prekida dovoda napojne vode te zbog velikog volumena posude usporilo se povećavanje tlaka u slučaju prekida vanjskog napajanja. Povećanjem omjera voda/gorivo u reaktorskoj posudi, reaktor je postao manje osjetljiv na prijelazne pojave čija je posljedica promjena tlaka. Prijelazne pojave koje su se pojavljivale zbog pumpi za prisilnu cirkulaciju i sigurnosnih pumpi, spriječene su dizajnom te uz izostanak parogeneratorskog dolazi do jako niske vjerojatnosti oštećenja. [4]

⁴ Ostatna toplina je toplina koju radioaktivnim raspadom stvaraju fisijski produkti nakon obustavljanja rada reaktora. U prvim sekundama nakon prestanka rada reaktora ona iznosi oko 5% topline koja se proizvodi kada reaktor radi na nazivnoj snazi.



Slika 4.5. ESBWR reaktor [7]

Tablica 4.1. Popis oznaka ESBW reaktora

Popis oznaka	Opis
Izolacijski kondenzatorski sustav ICS (eng.- Isolation Condenser System)	Kontrolira tlak reaktora i uklanja toplinu propadanja kada je reaktor izbačen uključujući i tijekom događaja prekida
Rashladni sustav pasivnog zatvaranja (eng.-The passive containment cooling system) PCCS	Pruža dugoročno hlađenje, te drži tlak unutar zadanih granica
GDCS (eng.- Gravity Driven Cooling System)	Osigurava hlađenje jezgre u slučaju gubitka rashladnog sredstva
Suzbijanje bazena i zračnog prostora (eng.- Suppression pool and airspace)	Prigušni bazen je toplinski spremnik, pročišćava maglu (paru) +aerosole. Zračni prostor je veličine 100% metalne reakcije vode.
„Hvatač jezgre“ (eng.-Core catcher) (BiMAC)	Zadržavanje rastopljene jezgre. Hvatač jezgre sprečava nastanak erozije i topljenje

(eng.- Basemat internal Melt Arrest and Coolability)	
--	--

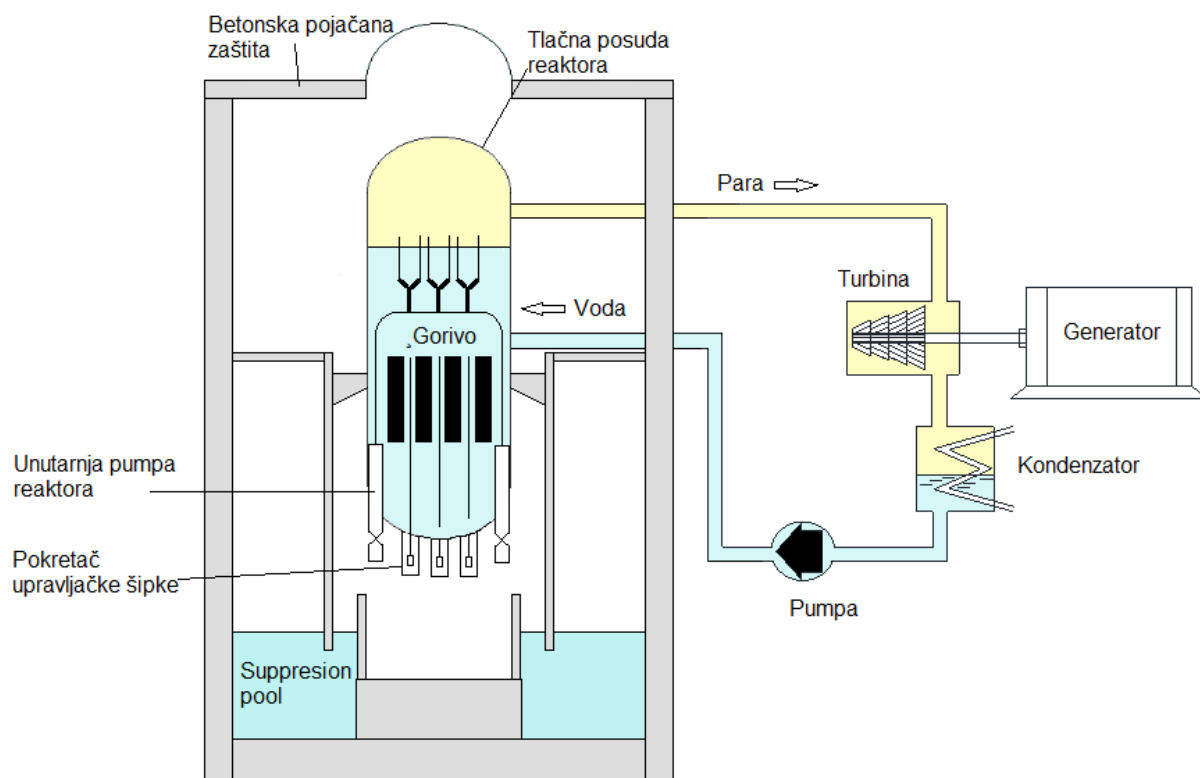
4.1.6. Usavršeni kipućom vodom hlađeni reaktor (ABWR)

Napredni ključajući vodom hlađeni reaktor (engl. Advanced Boiling Water Reactor) prvi je reaktor III generacije u pogonu i to od 1996. godine. Osim tri postrojenja u izgradnji u planu je još izgradnja devet reaktora u Japanu i dva u SAD-u. Licenciranje je obavljeno i u Tajvanu. Reaktor karakteriziraju poboljšana sigurnost, pouzdanost te pojednostavljeno upravljanje i održavanje. Također, smanjeni su troškovi pogona i održavanja, a trajanje izgradnje iznosi svega 39 mjeseci.[4]

Prednosti ove vrste reaktora:

- Reaktor koristi unutarnje pumpe – eliminiran vanjski recirkulacijski sistem što doprinosi povećanju sigurnosti,
- povećana seizmička otpornost,
- postignuta veća kompaktnost te lakša izgradnja,
- kompaktna reaktorska zgrada – skraćeno vrijeme izgradnje uz manji utrošak materijala,
- optimiran modularni dizajn – modularni dizajn je poboljšán i provjeren u već izgrađenim elektranama,
- usavršen kontrolni sistem – potpuno digitaliziran, omogućava pouzdano i točno nadgledanje elektrane, njenu kontrolu i detektiranje kvarova,
- unaprijeđena kemijska kontrola i integritet goriva – smanjena izloženost zračenju radnika i smanjena količina radioaktivnog otpada.

Snaga ABWR-a je od 1350 MWe do 1460 MWe [4].



Slika 4.6. ABWR reaktor [4]

4.2. Reaktori četvrte generacije

Razvoj IV generacije novih reaktora inicirala je američka vlada te je osnovan međunarodni forum u kojemu su bile definirani ciljevi tehnološkog razvoja novih reaktora. Prema tome su nove elektrane trebale zadovoljiti zahtjeve održivog razvoja te se utjecaj na okoliš treba zanemariti. Proliferacija nuklearnog materijala praktično mora biti onemogućena na tehnološkom nivou. Količina nuklearnog otpada treba se i mora smanjiti na najmanju razinu te također se uz to treba smaniti dugotrajan utjecaj na okoliš. Mogućnost oštećenja jezgre treba smanjiti na najmanju moguću mjeru i potrebno je postići izvrsnost u sigurnosti i pouzdanosti. Uz sve te zahtjeve potrebno je još eliminirati potrebu za planiranjem zaštitnih akcija izvan kruga postrojenja. U odnosu na ostale tehnologije potrebno je ostvariti ekonomsku prednost cjelogorivnog ciklusa. Što se tiče financijskog rizika, treba se izjednačiti s ostalim tehnologijama. Reaktori koji pripadaju ovoj generaciji bi trebali biti izrađeni do 2030. godine, te se smatraju predstavnicima budućnosti nuklearne energetike. Odabir je napravljen na osnovi ekoloških, sigurnosnih i ekonomskih parametara. Od ukupno šest reaktora, tri pripadaju grupi brzih reaktora, dva su termička i jedan

epitermički. Još jedna od poboljšanja je vidljiva u tome što se osim proizvodnje električne energije mogu koristiti i za proizvodnju vodika. [4]

Reaktori koji pripadaju IV. generaciji su:

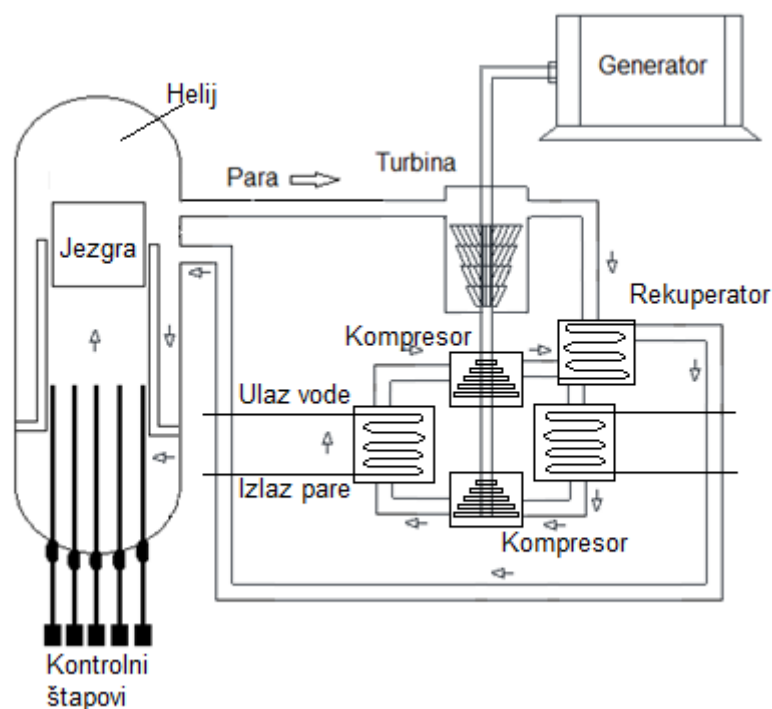
- EFK - plinom hlađen brzi reaktor (engl. Gas-cooled Fast Reactor)
- LFR- brzi reaktor hlađen olovom (engl. Lead-cooled Fast Reactor)
- MSR- reaktori s rastaljenim solima (engl. Molten Salt Reactor)
- SFR- natrijem hlađeni brzi reaktor (engl. Sodium – Cooled Fast Reactor)
- SCWR i SCFR- superkritični lakovodni reaktori (engl. Super - Critical Water – cooled Reactor)
- VHTR- vrlo visoko temperaturni plinom hlađeni reaktor (engl. Very High Temperature Reactor)

4.2.1. Plinom hlađen brzi reaktor (Helij) (GFK)

Tvrtka General Atomic's bavi se razvojem plinom hlađenog brzog reaktora, kojemu bi snaga bila 600 MW i 2.400 MW, koji se može koristiti za proizvodnju električne energije i za termokemijsku proizvodnju vodika. Kao plin se koristi helij.

Za proizvodnju električne energije rashladni plin direktno pokreće plinsku turbinu koristeći Brayton-ov ciklus. Gorivo, koje sadrži uranij i plutonij, u formi je karbida ili nitrida, a predviđeni odgor je do 250 GWd/t teškog metala. Predviđa se recikliranje istrošenog goriva direktno na lokaciji elektrane. Tako bi se ekstrahirani aktinidi vraćali natrag u reaktor kako bi se smanjila proizvodnja dugoživećeg radioaktivnog otpada na najmanju moguću mjeru. Plinom hlađeni brzi reaktor ima visok stupanj korisnog djelovanja oko 48%. Ulazna temperatura rashladnog sredstva iznosi 490 °C, a izlazna temperatura 850 °C, dok gustoća snage iznosi 100 MWt/m³.

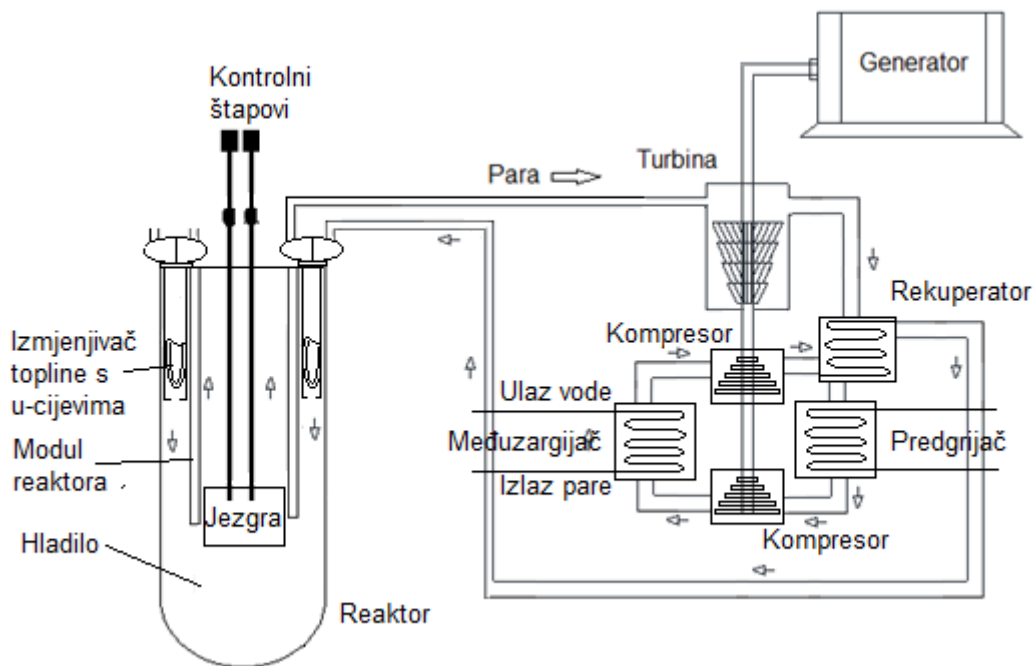
Razlika između ovog reaktora i visokotemperaturnog plinom hlađenog reaktora je u tome što nema moderator, veća gustoća snage u veći udjel fisibilnog materijala u jezgri. [4]. Plinom hlađeni brzi reaktor shematski je prikazan na slici 4.7.



Slika 4.7. Shema plinom hlađenog brzog reaktora (GER) [9]

4.2.2. Brzi reaktor hlađen olovom (LFR)

Rashladno sredstvo u brzom reaktoru hlađenog olovom (engl. Lead-cooled Fast Reactor) je tekuće olovo ili tekuća slitina olova i bizmuta, a hlađenje se obavlja prirodnom konvekcijom. Kao gorivo koristi se metalni uran ili u obliku uranij-plutonijskog nitrida s dodatkom aktinida dobivenih u postrojenjima za recikliranje. Predviđena snaga ovog reaktora je između 50 MW i 1200 MW. Za radnu temperaturu je predviđeno oko 550 °C, ali se pretpostavlja da će razvojem novih materijala omogućiti povećanje preko 800°C. Princip ovog reaktora uglavnom se bazira tehnologiji ruskog olovom hlađenog (BREST) reaktora razvijenog na temelju reaktora hlađenog s olovom-bizmutom hlađenim koji su se koristili u podmornicama te na temelju dva eksperimentalna dizajna: US STAR i LSPR [4]. Shema ovog tipa reaktora prikazana je na slici 4.8.

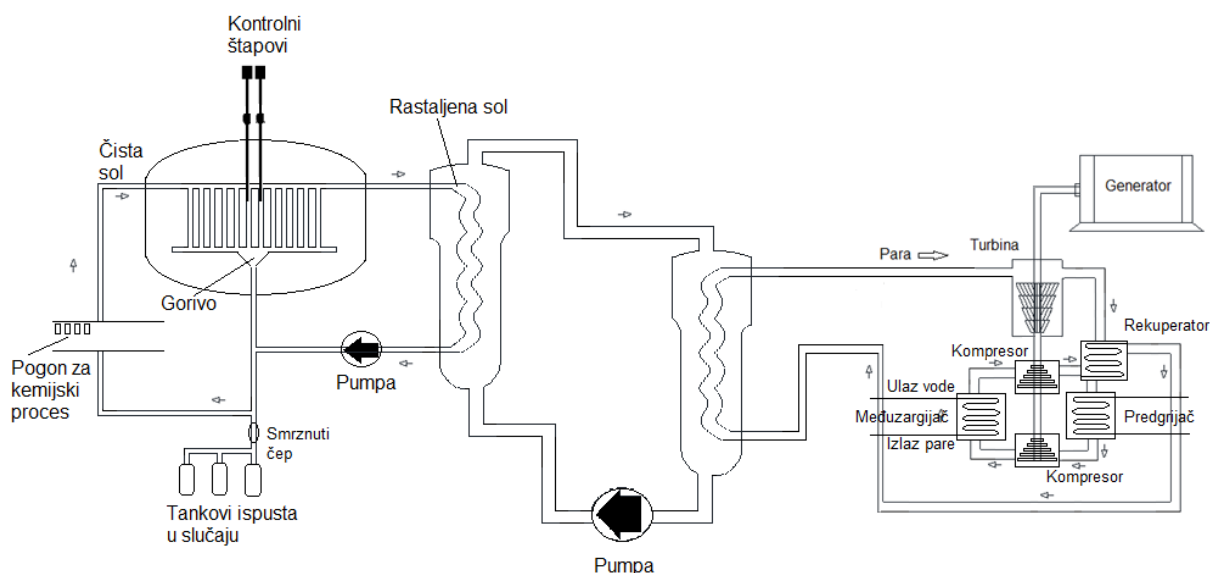


Slika 4.8. Shema brzog nuklearnog reaktora hlađenog olovom (LFR) [9]

4.2.3. Reaktori s rastaljenim solima (MSR)

Kod reaktora rastaljenim solima MSR (engl. Molten Salt Reactor) nuklearno gorivo, oplodni materijal i fisijski produkti pomiješani s rashladnim sredstvom zajedno cirkuliraju kroz kanale grafitne jezgre te kasnije kroz primarni izmjenjivač toplote. Grafitom je omogućena djelomična moderaciju tako da reaktor koristi epitermički dio neutronskeg spektra. Kao gorivo se koristi uran fluorida (UF_4 , s ^{233}U fisibilnim izotopom), a kao oplodni materijal torij (u formi ThF_4), a rashladno sredstvo je smjesa LiF i BeF_2 . Izlazna temperatura rashladnog sredstva i goriva, odnosno rastaljenih soli, iznosi oko $700\text{ }^\circ\text{C}$, dok je tlak posude $0,52\text{ MPa}$, a stupanj korisnog djelovanja oko 44% . Veliki iznos stupnja korisnog djelovanja u odnosu na ostale lakovodne reaktore je zahvaljujući radu na visokom temperaturama. Predviđena snaga ovog postrojenja je oko 1000 MW . Kod ovog dizajna uklonjena je klasična zamjena goriva jer se fisijski produkti kontinuirano uklanjaju iz rastaljenih soli. U primarnom izmjenjivaču toplote rastaljene soli primarnog kruga predaju toplinu sekundarnom rashladnom sredstvu – rastaljenoj smjesi NaBF_4 i NaF . Sekundarno rashladno sredstvo omogućava izolaciju između niskotlačnog reaktora i visokotlačnog parnog ciklusa. Nakon prolaska kroz sekundarni izmjenjivač toplote (parogenerator), fluid se vraća u primarni izmjenjivač toplote. Francuski projekt MSR-a predviđa rad pri temperaturi od $800\text{ }^\circ\text{C}$, te umjesto vodene pare se koristi helij. Prednosti ovog reaktora su

manja količina fisibilnog materijala, velika iskoristivost goriva, sigurnost rada zbog pasivnih sustava hlađenja na bilo kojoj snazi, te mala količina radioaktivnog otpada sastavljenog većinom od fisijskih produkata što rezultira kraćim vremenom poluraspada. Shema ovog tipa reaktora prikazana je na slici 4.9.



Slika 4.9. Shema brzog nuklearnog reaktora hlađenog rastaljenom soli (MSR) [9]

4.2.4. Natrijem hlađeni brzi reaktor

Korištenjem tekućeg natrija kao rashladnog sredstva u brzim reaktorima rezultira većom gustoćom snage, temperaturom i neutronske tokom unutar jezgre, odnosno potrebom za poboljšanim prijelazom topline na rashladni fluid. Natrij ima relativno nisku temperaturu vrenja (98°C), nizak apsorpcijski udarni presjek, dobru kompatibilnost s gorivom i strukturnim materijalima. To su dobra svojstva za strujanj. Jedna od loših karakteristika je kemijska aktivnost u dodiru sa zrakom ili vodom. Previđene su tri tipa brzog reaktora hlađenog natrijem: kompaktni tip (snage 600 do 1500 MWe), bazenski tip (snage 300 do 600 MWe) i modularni tip (snage 50 do 150 MWe). Gorivni ciklus⁵ koristi potpuno recikliranje aktinida u svakoj od spomenutih izvedbi. Svaki od predviđenih izvedbi koristi brzi dio neutronske spektra, natrij kao rashladno sredstvo, zatvoreni gorivni ciklus, uran kao oplodni materijal te je efikasan u tretmanu aktinida⁶. Kompaktni

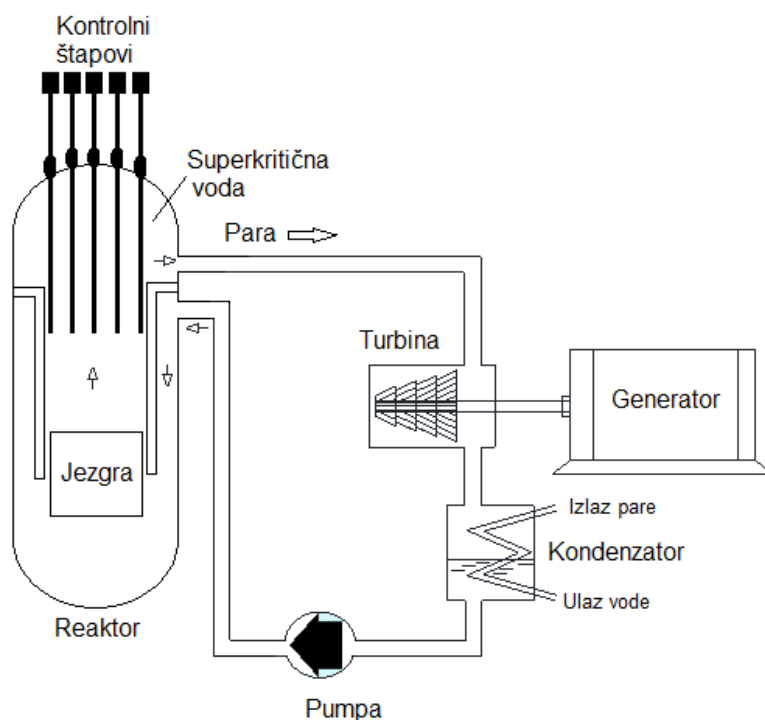
⁵ Svi koraci pridobivanja, obrade, upotrebe i zbrinjavanja nuklearnog goriva: vađenje rude i njezina obrada, obogaćivanje, proizvodnja goriva, upotreba goriva u reaktoru, pohrana istrošenog goriva i njegovo reprocesiranje ili konačno odlaganje

⁶ Skupina od 15 elemenata koji se nalaze između aktinija i lorenzija s atomskim brojevima od 89-103

[illegible]

1 9 7 0 1 9 7 1 1 9 7 2 1 9 7 3 1 9 7 4 1 9 7 5 1 9 7 6 1 9 7 7 1 9 7 8 1 9 7 9 1 9 8 0 1 9 8 1 1 9 8 2 1 9 8 3 1 9 8 4 1 9 8 5 1 9 8 6 1 9 8 7 1 9 8 8 1 9 8 9 1 9 9 0 1 9 9 1 1 9 9 2 1 9 9 3 1 9 9 4 1 9 9 5 1 9 9 6 1 9 9 7 1 9 9 8 1 9 9 9 2 0 0 0 2 0 0 1 2 0 0 2 2 0 0 3 2 0 0 4 2 0 0 5 2 0 0 6 2 0 0 7 2 0 0 8 2 0 0 9 2 0 1 0 2 0 1 1 2 0 1 2 2 0 1 3 2 0 1 4 2 0 1 5 2 0 1 6 2 0 1 7 2 0 1 8 2 0 1 9 2 0 2 0 2 0 2 1

nema izmjenjivač topline nego superkrična voda ne mijenja fazu već direktno pokreće turbinu. Predviđen snaga sustava je oko 1700 MWe, dok je radni tlak 25 MPa, a izlazna temperatura rashladnog fluida 510 °C. Postoji mogućnost povećanja do 550 °C. Kao gorivo koristi se uranov dioksid ako imamo slučaj otvorenog gorivnog ciklusa. Druga mogućnost je brzi superkrični reaktor (SCFR), iako je neutronske spektralno uglavnom između 10 i 104 eV, odnosno u rezonantnom području. Kao gorivo se koristi MOX (23% srednji udio plutonija) i faktor konverzije 1,034. Srednji odgor je 43,4 GWd/tU, dok je termička efikasnost 44,3%, a gustoća snage iznosi 105 MW/m³. Gorivni elementi imaju heksagonalni oblik, kao i omotači od osiromašenog urana. Jezgra je postavljena radijalno i vrlo je heterogena jer se u njoj nalaze moderatorski štapići od cirkonijevog hidrida te spomenuti gorivni elementi i omotač. Superkrični lakovodni reaktori su poboljšani u odnosu na klasični PWR reaktor zbog izostanka parogeneratorskog, a u odnosu na BWR reaktor jer nemaju recirkulacijske krugove i pripadajuće im pumpe, separatore i sušace pare, a kontrolni štapići ulaze u jezgru s gornje strane. Također je elektrana kompaktnija u odnosu na sadašnje lakovodne elektrane, čime je skraćeno vrijeme izgradnje te su smanjeni troškovi izgradnje jer se smanjila količina materijala [4]. Ovaj tip reaktora prikazan je na slici 4.11.



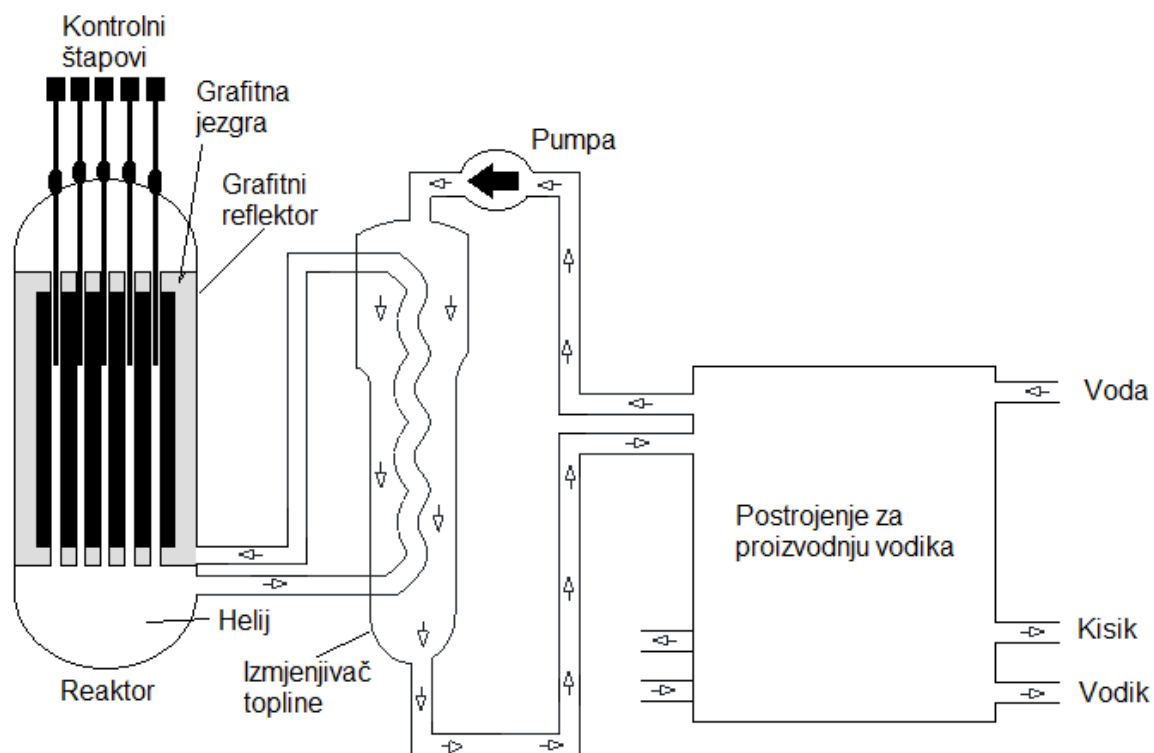
Slika 4.11. Shema superkričnog lakovodnog reaktora (SCWR) [9]

4.2.6. Vrlo visoko temperaturni plinom hlađeni reaktor (VHTR)

Vrlo visoko temperaturni plinom hlađeni reaktor (engl. Very High Temperature Reactor) je dizajn termičkog reaktora koji se uz proizvodnju električne energije koristi i za proizvodnju vodika te generiranje topline za potrebe različitih procesa. VHTR reaktor ima dva dizajna, kod blok dizajna jezgra je sastavljena od velikih grafitnih gorivnih elemenata koji imaju heksagonalni oblik, i drugi kod kojeg su gorivni elementi u obliku grafitnih kuglica (engl. pebble bed reaktor). Kako bi se postigao visoki odgor i spriječilo ispuštanje fisijskih produkata VHTR koristi takozvane "čestice" goriva – TRISO gorivo. Sastoji se od pet koncentričnih kugli ukupnog promjera manjeg od 1 mm. Prva kugla naziva se gorivna jezgra (engl. fuel kernel) i napravljena je od UO_2 i/ili PuO_2 . Obogaćenje urana iznosi između 10% i 20%. Gorivna jezgra ima različite polumjere: 350–500 μm u slučaju korištenja niskoobogaćenog urana, odnosno 150–300 μm u slučaju korištenja transuranskih elemenata. Oko nje dolazi omotač (eng. baffle layer) koji je napravljen od poroznog ugljika, a zadatak je osiguravanje prostora za plinovite fisijske produkte. Drugi omotač je pirolitički ugljik visoke gustoće koji štiti treći omotač (SiC) tokom ozračivanja, preventivno sprječava djelovanje klora na jezgru prilikom izrade te štiti SiC od djelovanja fisijskih produkata. Treći omotač je od SiC-a i otporan je na kemijsko djelovanje te predstavlja zaštitu od curenja plinovitih i metalnih fisijskih produkata. Vanjski omotač je također od pirolitičkog ugljika kojemu je zadatak vanjske zaštite SiC-a, i ako bi došlo do oštećenja preuzima njegovu ulogu. TRISO čestice stavljaju predviđene otvore za gorivo (ukupno 210 takvih otvora) u grafitnoj matrici (kompaktiranje goriva), i sudjeluju s volumnim udjelom (engl. packing factor - PF) između 20% i 40%.

Unutar prizmatičnog gorivnog elementa nalazi se i 108 otvora za rashladni fluid (helij), šest otvora za sagorive apsorbere i centralni otvor za rukovanje s gorivnim elementom. Kada bise za gorivo koristio 10% obogaćeni uran, u slučaju 12 mjesečnog radnog ciklusa, odnosno 3 šarže goriva, postigao bi se otpusni odgor veći od 100 GWd/tU. Duljina ciklusa i otpusni odgor ovisni su o koraku rešetke, polumjeru jezgre i PF-u. U slučaju da se koriste transuranski⁷ elementi za gorivo (sastav goriva odgovara izotopskom sastavu istrošenog goriva tipičnog PWR reaktora) moguće je postići odgore veće od 600 GWd/t teškog metala. Izlazna temperatura helija iznosi oko 1000 °C i rashladni plin ide direktno u turbinu koristeći Braytonov (Jouleov) proces. Predviđena je izrada postrojenja snage 600 MW [4]. Ovaj tip reaktora prikazan je na slici 4.12.

⁷ Umjetno dobiveni radioaktivni teški elementi s atomskim brojevima većim od 92, dolaze nakon urana. Dobiveni su pretvorbom elemenata u reaktoru. Među njima navise se upotrebljava plutonij. Imaju kratko vrijeme poluraspada pa se ne zadržavaju u prirodi.



Slika 4.12. Vrlo visoko temperaturni plinom hlađeni reaktor [9]

5. TERMODINAMIČKA ANALIZA ELEKTRANA

5.1. Termodinamički proračun termonuklearne elektrane sa BWR reaktorom

5.1.1. Općenito o reaktoru hlađenom i moderiranom s kipućom vodom (BWR) reaktor

Prvi reaktor s kipućom vodom je bio BORAX 1 (SAD), koji je stavljen u pogon polovicom 1954. godine, a imao je termičku snagu od samo 1,2MW. Zatim su bili eksperimentalni reaktori BORAX (ukupno 5 reaktora do 1962. godine), SPERT (ukupno četiri reaktora od 1955. do 1962. godine) i EBWR (1956. godine). Reaktori BORAX i SPERT imaju visokoobogaćeno gorivo (oko 90%), a reaktor EBWR slaboobogaćeni uran. Prvo veće postrojenje bilo je u redovnom pogonu u 1960. godini (Dresden, SAD).

Reaktor hlađen i moderiran kipućom vodom ujedinjuje funkcije primarnog kruga nuklearne elektrane u reaktorskoj posudi. U reaktorskoj jezgri pojava voda isparava, a zasićena para iz reaktorske posude neposredno se dovodi u turbinu. Taj tip nuklearnog reaktora omogućuje neposredni kružni proces voda-para, bez posredovanja parogeneratora, pa je takvo nuklearno energetska postrojenje kompaktnije. Reaktori s kipućom vodom trebaju manju snagu za pumpanje rashladnog sredstva nego reaktori s vodom pod tlakom.

Reaktorsko postrojenje

Isparivanje vode u reaktoru traži posebna rješenja i uređaje u reaktorskom postrojenju i u ostalim dijelovima elektrane. U reaktoru s kipućom vodom mora se osigurati recirkulacija vode, separacija vlage i sušenje pare u reaktorskoj posudi. Reaktorska posuda zbog toga ima velike dimenzije i težinu (visina iznosi oko 20m, promjer oko 6,5 m, a masa 700 do 800 t). reaktorska posuda mora se najčešće spajati na gradilištu, jer je prevelika za transport. Separatori vlage (obično cetrifugalne izvedbe) i sušionici pare moraju biti smješteni iznad reaktorske jezgre. Prije izmjene goriva treba te dijelove izvaditi iz reaktorske posude kako bi se omogućio pristup reaktorskoj jezgri. Takav smještaj separatora vlage i sušionika pare onemogućuje smještaj vodilica i kućišta regulacijskih sklopova u gornji dio posude, kao u reaktoru s vodom pod tlakom, te se svi dijelovi regulacijskih mehanizama nalaze ispod reaktorske jezgre.

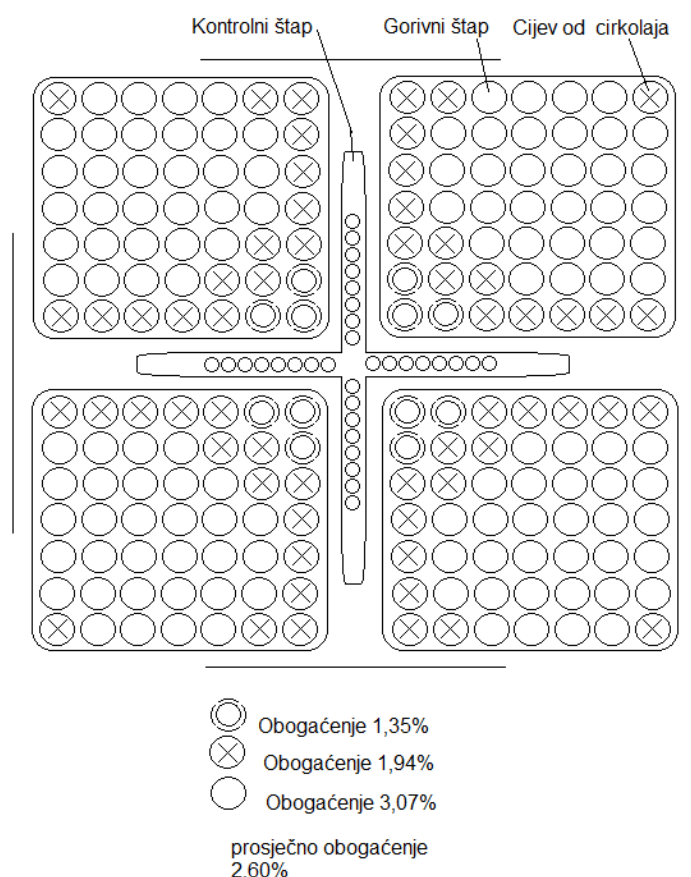
Jedan od bitnih uređaja u reaktoru s kipućom vodom je sustav za recirkulaciju vode u jezgri. Recirkulacijom se povećava proizvedena snaga u jezgri reaktora, jer se odvođenjem proizvedene pare povećava reaktivnost. Mijenjanjem količine vode u recirkulaciji moguće je znatno mijenjati

snagu reaktora bez pomaka regulacijskih šipki (u granicama $\pm 35\%$ oko trenutnog opterećenja). Voda se ponovno dovodi u jezgru ili cirkulacijskim pumpama koje su smještene izvan reaktorske posude i koje napajaju pumpe unutar reaktorske posude ili unutrašnjim cirkulacijskim pumpama s propelerima u reaktorskoj posudi, a pogonskim motorima izvan nje.

Omjer količine vode u recirkulaciji i količine isparene vode iznosi oko 6 do 8. Tlak je u posudi reaktora oko 7 MPa . On je mnogo niži nego u reaktoru s vodom pod tlakom. Debljina stijenke posude iznosi oko 150mm. Temperatura je pojne vode obično oko 480K, a količina proizvedene pare u reaktoru 1,5 do 1,6 kg/s po MW snage reaktora.

Gorivni elementi reaktora s kipućom vodom sastavljeni su od snopa šipki u kvadratnoj rešetki sa 7x7 ili 8x8 položaja. Promjer je gorivnih šipki 12mm. Šipke su od cijevi izrađenih od cirkonija, koje su ispunjene tabletama uran-dioksida. Duljina aktivnog dijela gorivnog elementa iznosi 3700mm. Gorivni elementi su smješteni u pojedinačne kutije. Reaktor s kipućom vodom snage 1000MW sadrži oko 700 takvih gorivnih elemenata u kojima se nalazi oko 124 t urana.

U prostoru između četiri kutije gorivnih elemenata proizlazi regulacijski sklop koji ima horizontalni presjek u obliku križa kao što je prikazano na slici 5.1.



Slika 5.1. Slog gorivnih elemenata sa po 7x7 gorivnih štapova s kontrolnim štapom u obliku križa za reaktor tipa BWR [1]

Kutije gorivnih elemenata služe i kao vodilice regulacijskih sklopova. Regulacijski sklop je čelična konstrukcija mase oko 170 kg, koja ima horizontalne ili vertikalne provrte napunjene bor-karbidom (B_4C). regulacijski sklopovi moraju osigurati veću rezervu negativne reaktivnosti nego što je potrebno u reaktoru s vodom pod tlakom, jer neposredni rashladni krug reaktora ne omogućuje upotrebu borne kiseline u reaktorskoj vodi. Reaktorska voda mora biti čista demineralizirana voda. Potrebnu rezervu negativne reaktivnosti moguće je osigurati, kad je reaktorska jezgra svjež, upotrebom izgorivih apsorbera. Kao izgorivi apsorber upotrebljava se gadolinij-oksidi (Gd_2O_3). Regulacijski sklopovi ulaze odozdo u jezgru, što je povoljno s gledišta kontrole reaktivnosti. U donjem je dijelu jezgre gustoća proizvedene snage veća zbog boljeg moderatorskog djelovanja vode, jer je udio pare u donjem dijelu jezgre manji nego u gornjem.

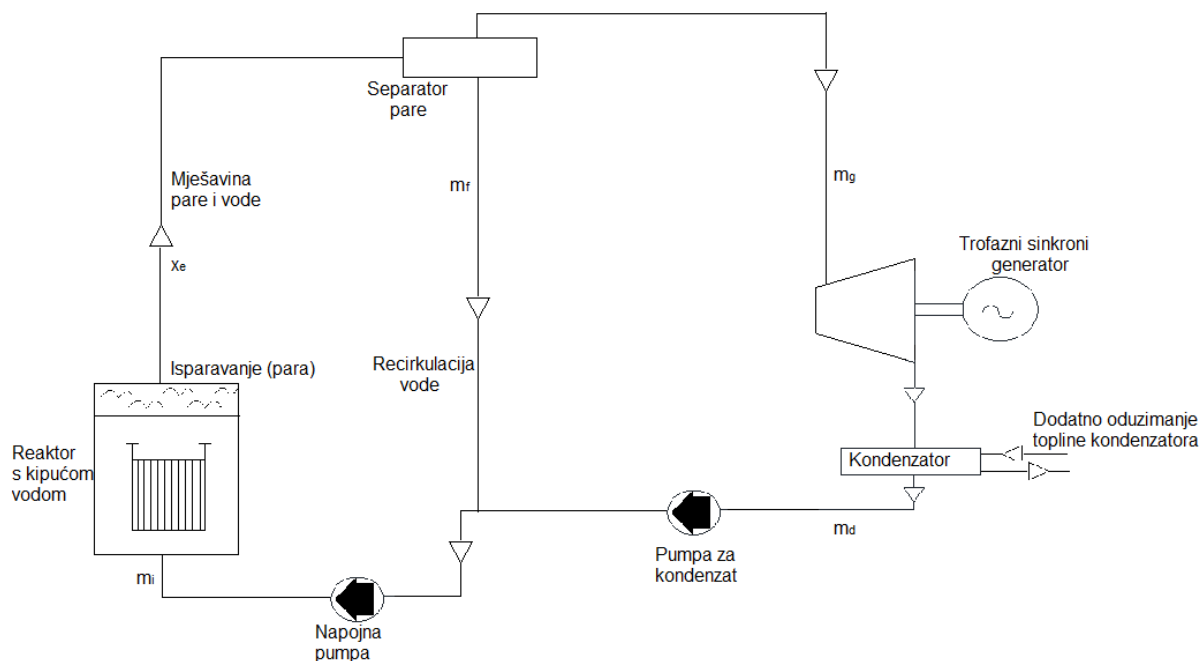
Za pogon regulacijskih sklopova služe dva pogonska sredstva. U normalnom pogonu sklopovi se pokreću pomoću elektromotora. Brzina podizanja i spuštanja regulacijskih sklopova iznosi oko 15mm/s. Za naglo obustavljanje reaktora predvođen je hidraulički pogon. Rezervoari s vodom pod stalnim su tlakom dušika. Električnim signalom ventili se na tim rezervoarima otvaraju i voda iz rezervoara potiskuje regulacijske sklopove u reaktorsku jezgru silom koja je oko 10 puta veća od njihove težine.

Reaktor s kipućom vodom ima negativni temperaturni koeficijent, koji je posljedica djelovanja temperature goriva i djelovanja šupljinja u moderatoru (kipuća voda) zbog pojave mjehurića pare. I povišenje temperature goriva i povećanje broja mjehurića pare u vodi povećavaju negativnost temperaturnog koeficijenta. Stabilan je pogon reaktora osiguran ako omjer volumena pare i volumena vode u jezgri nije veći od 0,2 do 0,3.

Da bi se zaštitila okolina u slučaju loma cjevovoda koji ulaze u reaktor (pojni cjevovodi, recirkulacijski cjevovodi, parovodi), reaktorsko je postrojenje smješteno u sigurnosni štit. Zbog kompaktinije izvedbe reaktorskog postrojenja dimenzije su toga štita za reaktor s kipućom vodom mnogo manje nego za reaktor s vodom pod tlakom. Izvedbe sigurnosnog štita i uređaja za reaktor s kipućom vodom međusobno se prilično razlikuju. Zbog ekspanzije pare nakon loma cjevovoda ili zbog otvaranja rasteretnih ventila pri lomu cjevovoda raste tlak u prozoru unutar sigurnosnog štita. Tlak se pare smanjuje njezinom kondenzacijom u kondenzacijskim komorama (bazenima s vodom) unutar sigurnosnog štita. Dodatno se smanjenje tlaka postiže prskanjem vode u parni prostor.

Iz nuklearne elektrane s reaktorom s kipućom vodom ne smije se para ispuštati u okolinu. [1]

5.1.2 Termodinamički proračun



Slika 5.2. Shematski prikaz BWR elektrane

Proces recirkulacije rashladnog sredstva odvija se ili prirodnim putem zbog razlika gustoće tekućine (razlike temperature) na vrhu i na dnu ili prisilno cirkulacijskom pumpom. Omjer količine vode u recirkulaciji i količini isparene vode naziva se cirkulacijski omjer. Cirkulacijski omjer je funkcija koja ovisi o procesima u jezgri. Cirkulacijski omjer iznosi od 6 do 10. Održavanje konstantnog i poznavanje cirkulacijskog omjera nužno je kako se ne bi smanjio udio rashladne tekućine koja hladi reaktor, a istovremeno i moderator (inače bi došlo do presporog odvođenja topline ili čak prevelike količine isparavanja vode i taljenja jezgre).

Blago pothlađena tekućina ulazi kroz dno jezgre, iznosa masenog protoka m_i te popunjava prostor jezgre i kanala. Kanal je negrijani dio iznad jezgre koji pridonosi povećanju pritiska kako bi se poboljšala sposobnost prirodne cirkulacije. Nastala para odvaja se od zagrijane tekućine (separator pare) te struji prema turbini masenim protokom m_g , odvojena tekućina recirkulira okolnim putem iznosa m_f prema napojnoj pumpi gdje se miješa sa tekućinom koja izlazi iz kondenzatora m_d (ohlađena para koja je sudjelovala u pretvorbi toplinske energije – mehanička energija). Ukupan maseni protok koji ulazi u napojnu pumpu iznosi m_i – opisani proces je kružni proces (može se vidjeti na slici 5.2.). Ukupni maseni protok u reaktorskoj jezgri iznosi:

$$m_d = m_g \quad (5-1)$$

$$m_g + m_f = m_i \quad (5-2)$$

Omjer mješavine pare - tekućine na izlazu iz jezgre x_e može se zapisati kao:

$$x_e = \frac{m_g}{m_f + m_g} = \frac{m_d}{m_f + m_d} = \frac{m}{m_i} \quad (5-3)$$

Zanemarivanjem gubitaka topline, kinetičke energije (unutarnje energije) može se napisati zakon očuvanja energije:

$$m_i \cdot h_i = m_f \cdot h_f + m_d \cdot h_d \quad (5-4)$$

gdje su h_i , h_f i h_d entalpije određenih masenih protoka. Povezivanjem izraz (5-3) i izraza (5-4) dobiva se :

$$h_i = (1-x_e) \cdot h_f + x_e \cdot h_d \quad (5-5)$$

Izraz (5-5) može se napisati i kao:

$$x_e = \frac{h_f - h_i}{h_f - h_d}$$

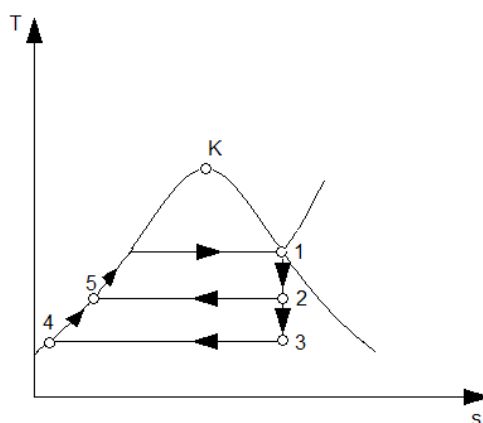
Entalpija pothlađene tekućine na dnu jezgre :

$$\Delta h_{poth} = h_f - h_i = x_e \cdot (h_f - h_d) \quad (5-6)$$

Ukupna proizvedena topline može se odrediti izrazom (5-7):

$$Q_t = m \cdot (h_f + x_e \cdot h_{fg} - h_i) = m_g \cdot (h_g - h_d) \quad (5-7)$$

T-s dijagram primarnog kruga je zatvoreni ciklus i pokazan je krivuljom zasićenja na slici 5.3., promjena u entropije primarnog kruga nije velika.



Slika 5.3. Rankineov ciklus BWR elektrane prikazan u T-s dijagramu

Tehnički podaci BWR reaktora kojega ćemo analizirati prikazani su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Tehnički podatci analiziranog BWR reaktora [10]

Tlak sustava	7,2 MPa
Maksimalna termička snaga (jezgre/primarnog kruga), P_{prim}	3888,26 MWth
Električna snaga	1130 MWe
Termički stupanj djelovanja	34%
Broj gorivih elemenata	764
Brzina protoka mase u jezgri	13702 kg /s
Temperatura rashladnog sredstva na ulazu u reaktorsku posudu	278,3°C
Povećanje temperature rashladnog sredstva (kroz reaktorsku posudu), ΔT	8,9
Temperatura rashladnog sredstva na izlazu iz reaktorske posude	287,2°C
Temperatura kondenzatora, T_{kond}	56 °C
Povećanje temperature rashladnog sredstva (kroz reaktorsku posudu)	13,1%
Maseni protok rashladnog sredstva (primarnog kruga)	1820 kg/s
Temperatura rashladnog sredstva	220 °C
Brzina protoka pare	1820 kg/s
Temperatura pare	287,2 °C
Gustoća snage jezgre,	50,5 kW / L
Temperaturni koeficijent goriva	-1,7 pcm / K
Prosječna linearna snaga	16,46 kW / m
Pad tlaka	160 kPa
Prosječno obogaćivanje	4,31 wt%
Odgor, energetska vrijednost	56 GWd / t

Ako pretpostavimo da analizirani BWR reaktor radi sa masenim protokom suhozasićene pare $\dot{m}_s=1000$ kg/s pri tlaku iznosa $p_3 = 7$ MPa te ekspandira do tlaka kondenzatora $p_4 = 160$ kPa uz stupanj korisnog djelovanja turbine od $\eta_T=0,9$ potrebno je odrediti snagu kojom radi turbina \dot{W}_t .

Upotrebom $p-h$ dijagrama za vodenu paru za tlak od $p_3 = 7$ MPa i masenog sadržaja pare u proizvedenoj suhozasićenoj pari $x = 1$ možemo očitati entalpiju $h_3 = 2775$ kJ/kg, $t_3 = 285^\circ\text{C}$. Entropija se za ovu točku može očitati iz Molierovog dijagrama na temelju $x = 1$ i entalpije točke h_3 , $s_3 = s_{4s} = 5,822$ kJ/kg·K temperature u kondenzatoru $t_{kond} = t_4 = 56^\circ\text{C}$ uz tlak $p_4 = p_{kond} = 160$ kPa. Pomoću tablice zasićene vodene pare korištenjem temperature kondenzatora T_4 možemo očitati specifičnu entropiju kapljevine $s_f = 0,7677$ kJ/kg·K, specifičnu entalpiju kapljevine $h_f = 233,3$ kJ/kg te specifičnu entalpiju zasićene pare $s_g = 7,993$ kJ/kg K i specifičnu entalpiju zasićene pare $h_g = 2605$ kJ/kg. Također korištenjem tablice suhozasićene vodene pare uz pomoć temperature $t_3 = 285^\circ\text{C}$ očitamo spomenute podatke koji su prikazani u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Tablica očitanih podataka pojedinih točaka

TEMPERATURA ($^\circ\text{C}$)	56	285
TLAK	≈ 160 kPa	≈ 7 MPa
Specifična entalpija kapljevine h_f (kJ/kg)	233,3 ($h_f \approx h_1$)	1264
Specifična entalpija isparavanja h_{fg} (kJ/kg)	2371,7	1511
Specifična entalpija pare h_g (kJ/kg)	2605 (h'')	2775 (h_3)
Specifična entropija kapljevine s_f (kJ/kg·K)	0,7677 (s')	3,115
Specifična entropija isparavanja s_{fg} (kJ/kg·K)	7,22	2,707
Specifična entropija pare s_g (kJ/kg·K)	7,993 (s'')	5,822

Na temelju slijedećeg izraza možemo odrediti stupanj masenog sadržaja pare (suhozasićene pare) x_{4s} točke 4 [10]:

$$x_{4s} = \frac{s_{4s} - s_f}{s_g - s_f} \quad (5-8)$$

Gdje je $s_{4s} = s_3$ specifična entropija vlažne pare. Uvrštavanjem podataka u izraz (5-8) dobiva se:

$$x_{4s1} = \frac{5,822 - 0,7677}{7,993 - 0,7677} = 0,699$$

Korištenjem izraza (5-5) možemo izračunati h_{4s} ili očitati približnu vrijednost iz $p-h$ dijagrama:

$$h_{4s} = h_f + x \cdot h_{fg} = x_{4s} \cdot h_g + (1 - x_{4s}) \cdot h_f$$

$$h_{4s1} = 0,699 \cdot 2605 + (1 - 0,699) \cdot 233,3 = 1893,49 \text{ kJ/kg}$$

Uz poznat stupanj djelovanja turbine koji iznosi 90% ($\eta_T = 0,9$) možemo izračunati entalpiju h_4 :

$$h_3 - h_4 = \eta_T \cdot (h_3 - h_{4s}) \rightarrow h_4 = h_3 - \eta_T \cdot (h_3 - h_{4s})$$

$$h_{41} = 2775 - 0,9 \cdot (2775 - 1893,49) = 1981,64 \text{ kJ/kg}$$

Turbina obavlja koristan rad odnosno pretvorbu toplinske energije u mehaničku energiju.

Možemo zapisati:

$$0 - W_t = \dot{m}_s \cdot (h_4 - h_3) \rightarrow W_t = \dot{m}_s \cdot (h_3 - h_4)$$

Uz poznatu entalpiju h_4 možemo izračunati snagu turbine $P_t = \dot{W}_t$:

$$\begin{aligned} P_t &= 1000 \cdot (h_3 - h_4) = \\ P_{t1} &= 1000 \cdot (2775 - 1981,64) = \\ &= 793\,360 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 793,35 \text{ MW} \end{aligned}$$

Ako vrijedi da je tlak radnog medija prije pumpe jednak tlaku u kondenzatoru $p_1 = p_4$ i da je $p_2 = p_3$ tlak nakon pumpe jedan tlaku na ulazu u turbinu, uz poznatu gustoću vode $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ možemo zapisati :

$$h_{2s} - h_1 = \frac{p_2 - p_1}{\rho} \quad (5-9)$$

Uvrštavanjem poznatih podataka u izraz (5-9) dobiva se entalpija točke 2, h_2 :

$$\begin{aligned} h_{2s} - h_1 &= \frac{7 \cdot 10^6 - 160 \cdot 10^3}{1000} = 6840 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 6,84 \text{ kJ/kg} \\ h_{2s1} &= 233,3 + 6,84 = 240,14 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Snaga pumpe može se izračunati na temelju izraza:

$$0 - P_{pumpe} = \dot{m}_s \cdot (h_{2s} - h_1) \quad (5-10)$$

Iz prethodnog izraza vidimo kako je snaga pumpe negativna vrijednost. Ta negativna vrijednost je zbog toga što je potrebni uložiti energiju u sustav i pri izračunu stupnja djelovanja ona se oduzima od dobivenog mehaničkog rada. Uz stupanj djelovanja pumpe koji iznosi oko $\eta_p = 0,85$ možemo izračunati snagu (energiju) pumpe.

$$P_{pumpe,1} = \frac{1000 \cdot (240,14 - 233,3)}{\eta_p} = 8,05 \text{ MW}$$

Uz pretpostavku da je sva oduzeta toplota reaktora u generatoru pare predana radnom mediju (sekundarni krug), možemo izračunati maksimalnu termičku snagu sekundarnog kruga reaktora:

$$\begin{aligned} P_{reaktora} &= 1000 \cdot (h_3 - h_{2s}) \\ P_{reaktora,1} &= 1000 \cdot (2775 - 240,14) = 2\,534\,860 \text{ kW} = 2534,86 \text{ MW} \end{aligned}$$

Može se odrediti termički stupanj korisnog djelovanja pretvorbe radnog medija – vodene pare:

$$\eta_{TER,1} = \frac{P_t - P_{pumpe}}{P_{reaktora}} = \frac{793,35 - 8,05}{2534,8} = 0,3098 = 30,98\%$$

5.2. Termodinamički proračun VHTR termonuklearne elektrane

5.2.1. Općenito o vrlo visokotemperaturnom reaktoru

Vrlo visokotemperaturni reaktor (VHTR) je grafitno-moderirani reaktor s hlađen helijem s ciklusom goriva urana. VHTR sustav je dizajniran kao visoko učinkoviti sustav koji može opskrbiti toplinu procesa u širokom spektru visokotemperaturnih i energetski intenzivnih, neelektričnih procesa. Sustav može uključivati opremu za proizvodnju električne energije za potrebe kogeneracije. Zbog visoke temperature u jezgri reaktora ugljikov-dioksid nije primjenjiv kao rashladno sredstvo jer pri temperaturi pri višoj od 1000 °C postaje kemijski nestabilan. Kao rashladno sredstvo koristi se helij zbog svojih dobrih termičkih svojstava, te odlične kemijske i nuklearne stabilnosti. U parogeneratorima se hlađenjem helija proizvodi para s parametrima kao u konvencionalnim termoelektranama. Sekundarni krug elektrane izveden je kao u termoelektranama s međupregrijavanjem pare. Visoke temperature plina u reaktoru omogućavaju iskorištavanje toplinske energije i za proizvodnju električne energije kao i za druge industrijske procese (oplemenjivanje konvencionalnih goriva (proizvodnja vodika termičkom disocijacijom vode, rasplinjavanje ugljena)). Sustav također ima fleksibilnost za usvajanje ciklusa goriva uranija i plutonija i nudi poboljšanu smanjenu količinu otpada. VHTR nudi širok spektar procesnih procesa toplinske energije i opciju za visoko učinkovitu proizvodnju električne energije, uz zadržavanje poželjnih sigurnosnih karakteristika koje nude modularni visokotemperaturni plinski rashladni reaktori. Referentni reaktor je jezgra od 600 MWth povezana s međuprostorom izmjenjivača topline za isporuku procesne topline. Jezgra reaktora može biti prizmatska blok-jezgra kao što je operativni japanski HTTR ili jezgra šljunčane kore kao što je operativni kineski HTR-10. Za proizvodnju vodika, sustav opskrbljuje toplinu koja bi se mogla učinkovito koristiti termokemijskim procesom sumpor-joda. [11]

5.2.2. Termodinamički proračun

Tablica 5.3. Tehnički podatci analiziranog VHTR reaktora [12]

Tlak sustava	6,4 MPa
Maksimalna termička snaga (jezgre/primarnog kruga), P_{prim}	600 MWth
Električna snaga	132,5 MW
Toplinska snaga	250 MW
Broj gorivih elemenata	360
Brzina protoka mase u jezgri	322 kg /sec
Temperatura rashladnog sredstva na ulazu u reaktorsku posudu	520 °C
Povećanje temperature rashladnog sredstva (kroz reaktorsku posudu), ΔT	380
Temperatura rashladnog sredstva na izlazu iz reaktorske posude	900°C
Temperatura kondenzatora, T_{kond}	35 °C
Temperatura rashladnog sredstva	280 °C
Maseni protok rashladnog sredstva (helija)	126,7 kg /s
Radni tlak reaktorske posude	7,73 MPa
Pad tlaka	58 kPa
Odgor, energetska vrijednost	150-200 GWd / t

Kao i u prethodnom slučaju, uz pomoć Molierovog dijagrama te tablica suhozasićene vodene pare očitani smo slijedeće podatke za VHTR reaktor. Očitani podaci nalaze se u tablici

Tablica 5.4. Tablica očitanih podataka pojedinih točaka

TEMPERATURA (°C)	35	285
TLAK	≈ 58 kPa	$\approx 6,4$ Mpa
Specifična entalpija kapljevine h_f (kJ/kg)	146,6 ($h_f \approx h_1$)	1210,7
Specifična entalpija isparavanja h_{fg} (kJ/kg)	2418,4	1574,5
Specifična entalpija pare h_g (kJ/kg)	2565(h'')	2784 (h_3)
Specifična entropija kapljevine s_f (kJ/kg·K)	0,5049 (s')	3,0221
Specifična entropija isparavanja s_{fg} (kJ/kg·K)	7,8491	2,8723
Specifična entropija pare s_g (kJ/kg·K)	8,354(s'')	5,8944

Na temelju slijedećeg izraza možemo odrediti stupanj masenog sadržaja pare (suhozasićene pare) x_{4s} točke 4 [10]:

$$x_{4s} = \frac{s_{4s} - s_f}{s_g - s_f} \quad (5-11)$$

Gdje je $s_{4s} = s_3$ specifična entropija vlažne pare. Uvrštavanjem podataka u izraz (5-11) dobiva se:

$$x_{4s,2} = \frac{5,8944 - 0,5049}{8,354 - 0,5049} = 0,687$$

Korištenjem izraza (5-5) možemo izračunati h_{4s} ili očitati približnu vrijednost iz p - h dijagrama:

$$h_{4s} = h_f + x \cdot h_{fg} = x_{4s} \cdot h_g + (1 - x_{4s}) \cdot h_f$$

$$h_{4s,2} = 0,687 \cdot 2565 + (1 - 0,687) \cdot 146,6 = 1808,04 \text{ kJ/kg}$$

Uz poznat stupanj djelovanja turbine koji iznosi 90% ($\eta_T = 0,9$) možemo izračunati entalpiju h_4 :

$$h_3 - h_4 = \eta_T \cdot (h_3 - h_{4s}) \rightarrow h_4 = h_3 - \eta_T \cdot (h_3 - h_{4s})$$

$$h_{4,2} = 2784 - 0,9 \cdot (2784 - 1808,04) = 1905,64 \text{ kJ/kg}$$

Turbina obavlja koristan rad odnosno pretvorbu toplinske energije u mehaničku energiju.

Možemo zapisati:

$$0 - W_t = \dot{m}_s \cdot (h_4 - h_3) \rightarrow W_t = \dot{m}_s \cdot (h_3 - h_4)$$

Uz poznatu entalpiju h_4 možemo izračunati snagu turbine $P_t = \dot{W}_t$:

$$P_t = 1000 \cdot (h_3 - h_4) =$$

$$P_{t,2} = 1000 \cdot (2784 - 1905,64) =$$

$$= 878\,360 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 878,36 \text{ MW}$$

Ako vrijedi da je tlak radnog medija prije pumpe jednak tlaku u kondenzatoru $p_1 = p_4$ i da je $p_2 = p_3$ tlak nakon pumpe jedan tlaku na ulazu u turbinu, uz poznatu gustoću vode $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ možemo zapisati :

$$h_{2s} - h_1 = \frac{p_2 - p_1}{\rho} \quad (5-12)$$

Uvrštavanjem poznatih podataka u izraz (5-9) dobiva se entalpija točke 2, h_2 :

$$h_{2s,2} - h_1 = \frac{6,4 \cdot 10^6 - 58 \cdot 10^3}{1000} = 6342 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 6,342 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s} = 146,6 + 6,342 = 152,942 \text{ kJ/kg}$$

Snaga pumpe može se izračunati na temelju izraza:

$$0 - P_{pumpe} = \dot{m}_s \cdot (h_{2s} - h_1) \quad (5-13)$$

Iz prethodnog izraza vidimo kako je snaga pumpe negativna vrijednost. Ta negativna vrijednost je zbog toga što je potrebni uložiti energiju u sustav i pri izračunu stupnja djelovanja ona se oduzima od dobivenog mehaničkog rada. Uz stupanj djelovanja pumpe koji iznosi oko $\eta_P = 0,85$ možemo izračunati snagu (energiju) pumpe.

$$P_{pumpe,2} = \frac{1000 \cdot (152,942 - 146,6)}{\eta_P} = 7,461 \text{ MW}$$

Uz pretpostavku da je sva oduzeta toplota reaktora u generatoru pare predana radnom mediju (sekundarni krug), možemo izračunati maksimalnu termičku snagu sekundarnog kruga reaktora:

$$P_{reaktora} = 1000 \cdot (h_3 - h_{2s})$$

$$P_{reaktora,2} = 1000 \cdot (2784 - 152,942) = 2\,631\,058 \text{ kW} = 2631,06 \text{ MW}$$

Može se odrediti termički stupanj korisnog djelovanja pretvorbe radnog medija – vodene pare:

$$\eta_{TER,2} = \frac{P_t - P_{pumpe}}{P_{reaktora}} = \frac{878,36 - 7,461}{2631,06} = 0,3310 = 33,10\%$$

5.3.Usporedba dobivenih rezultata

Tablica 5.5. Usporedba podataka BWR reaktora i VHTR reaktora

	BWR reaktor	VHTR reaktor
Maksimalna termička snaga	3888,26 MWth	600 MWth
Tlak sustava	7,2 MPa	6,4 MPa
Temperatura rashladnog sredstva na ulazu u reaktorsku posudu	278,3°C	520°C
Temperatura rashladnog sredstva na izlazu u reaktorsku posudu	287,2°C	900°C
Prosječno sagorijevanje pražnjenja	56 GWd / t	150-200 GWd / t
Specifična entalpija pare h_3 (prije ulaza u turbinu)	2775kJ/kg	2784 kJ/kg
Specifična entalpije vlažne pare h_4 (nakon turbine)	1981,64 kJ/kg	1808,04 kJ/kg
Snaga turbine	793,35MW	878,36 MW
Snaga pumpe	8,05 MW	7,461MW
Snaga reaktora	2534,86 MW	2631,06 MW
Termički stupanj djelovanja	30%	33,10%

U tablici su prikazani podaci i dobiveni rezultati reaktora koje sam usporedila. Za usporedbu sam odabrala reaktor hlađenom i moderiranom s kipućom vodom koji pripada II generaciji reaktora i vrlo visokotemperaturni reaktor koji pripada IV generaciji. Iz podataka se vide razna poboljšanja VHTR reaktora u odnosu na reaktor iz II generacije. VHTR reaktor kako bi se postigao visoki odgor i spriječio ispuštanje fisijskih produkata koristi takozvane "čestice" goriva – TRISO gorivo. Time se postigla četiri puta veći iznos odgora. U tablici također vidimo kako su se povećale temperature rashladnog sredstva. BWR kao rashladno sredstvo koristi vodu dok VHTR reaktor kao rashladno sredstvo koristi helij zbog svojih dobrih termičkih svojstava, te odlične kemijske i nuklearne stabilnosti. Maksimalna termička snaga kod BWR reaktora je 3888,26MWe, a kod VHTR reaktora 600 MWe. Snaga je šest puta manja, ali kada uspoređujemo termički stupanj djelovanja vidimo kako imaju približno sličan iznos, iako je kod VHTR reaktora veći. Iz dobivenih podataka, odnosno stupnja djelovanja možemo zaključiti kako reaktor iz II generacije koji ima skoro 6 puta veću termičku snagu od VHTR reaktora, ostvaruje termički stupanj djelovanja sličan kao reaktor čija je snaga mnogo manja. Te su time također dokazana mnoga unaprijeđenja IV generacije.

ZAKLJUČAK

U zadnja tri desetljeća nuklearna energija ima značajnu ulogu u proizvodnji električne energije. Do jakog proboja nuklearne energije dolazi ponajprije zbog njezine čistoće i gotovo nikakvog ispuštanja stakleničnih plinova te je nuklearna energija konstantan, čist i pouzdan izvor električne energije. Najveća opasnost za okoliš iz nuklearne elektrane dolazi od radioaktivnog materijala koji se nuklearnim reakcijama stvara u nuklearnom reaktoru. Količina tog radioaktivnog materijala, koja se sastoji od istrošenog goriva visoke aktivnosti i aktivacijskih produkata niske i srednje aktivnosti, je relativno mala. Nuklearne elektrane projektirane su, izgrađene i koriste se na način kako bi spriječili ispuštanje radioaktivnog materijala u okoliš. Jedna od prednosti nuklearnih elektrana je to što se toplinska energija ne dobiva sagorjevanjem goriva nego nuklearnom fisijom te pri tome elektrana ne ispušta u okoliš štetne produkte sagorjevanja kao što su ugljični dioksid, dušični oksidi i sumporni dioksid. Kolika je ta prednost uistinu značajna, pokazuju neke procjene prema kojima upotreba nuklearne energije Europi godišnje uštedi ispuštanje oko 800 milijuna tona ugljičnog dioksida. [7] Prilikom istraživanja koje elektrane mogu neograničeno proizvoditi velike količine električne energije s obzirom na utjecaj na okoliš, najbolji rezultat su pokazale nuklearne elektrane. Time je dokazano da se razvoj i izgradnja nuklearnih postrojenja nikako ne mogu osporavati ekološkim razlozima. Proizvodnja električne energije kod nuklearnih elektrana slična je termoelektranama na fosilna goriva. Razlika je u proizvodnji toplinske energije, koja se kod nuklearnih elektrana dobiva fisijom nuklearnog goriva u reaktoru, a kod termoelektrana izgaranjem fosilnog goriva. Spomenute nuklearne i termoelektrane koriste Rankine-ov kružni proces. U njemu se proizvedena toplinska energija koristi za pretvorbu vode u vodenu paru visokog tlaka i temperature. Dalje se ta proizvedena para dovodi u turbinu gdje se energija pare pretvara u mehanički rad koji pokreće osovinu turbine. Na nju je spojen električni generator koji pretvara mehaničku energiju turbine u električnu energiju koja se predaje elektroenergetskom sustavu. Što se tiče stupnja djelovanja spomenute dvije elektrane, veći stupanj djelovanja imaju moderne termoelektrane. Razlog je niža srednja temperatura rashladnog sredstva u reaktoru nuklearne elektrane u odnosu na temperaturu koja se pokavljuje u ložištu parnog kotla kod termoelektrana. Temperatura rashladnog sredstva nuklearne elektrane ovisi o temperaturi košuljice gorivnih štapova i maksimalnoj temperaturi goriva. Visoka temperatura dovodi do taljenja reaktora, a visoka temperatura košuljice izaziva mehaničko oštećenje i ispuštanje fisijskih produkata u rashladno sredstvo. U ovom radu napravljena je termodinamička analiza dva nuklearna reaktora. Prvo smo analizirali reaktor hlađen i moderiran kipućom vodom kojemu je tlak sustava

7,2 MPa te maksimalna termička snaga (jezgre) 3888,26 MWth te smo proračunom dobili termički stupanj djelovanja 30,98%. Drugi analizirani reaktor je vrlo visokotemperaturni reaktor kojemu tlak sustava iznosi 6,4 MPa, a maksimalna termička snaga je 600 MWth. Stupanj korisnog djelovanja kojeg smo dobili u proračunu je 33,10%. Iz dobivenih podataka, odnosno stupnja djelovanja možemo zaključiti kako reaktor iz II generacije koji ima skoro 6 puta veću termičku snagu od VHTR reaktora, ostvaruje termički stupanj djelovanja sličan kao reaktor čija je snaga mnogo manja. Time smo dokazali značajna unaprijeđenja tehnološkog razvoja reaktora IV generacije. Osim toga, usporedbom tehničkih podataka analiziranih reaktora vidimo mnoga poboljšanja kao veću temperaturu rashladnog sredstva čime se omogućava iskorištavanje toplinske energije i za proizvodnju električne energije kao i za druge industrijske procese. Kao rashladno sredstvo koriste helij zbog dobrih termičkih svojstava, te odlične kemijske i nuklearne stabilnosti. Zbog visoke temperature u jezgri reaktora ugljikov-dioksid nije primjenjiv kao rashladno sredstvo jer pri temperaturi pri višoj od 1000 °C postaje kemijski nestabilan. Prvi reaktori koji pripadaju IV generaciji trebali biti izgrađeni do 2030. godine, te će se time postići značajna poboljšanja na osnovu ekoloških, sigurnosnih i ekonomskih parametara. Vrlo visoko temperaturni plinom hlađeni reaktor je primjer termičkog reaktora koji se uz proizvodnju električne energije koristiti i za proizvodnju vodika i generiranje topline za potrebe različitih procesa, što predstavlja još jednu od prednosti novih generacija. Poboljšanja su također vidljiva i u dužem radnom vijeku, kraćem vremenu izgradnje uz smanjenje troškova izgradnje. Nove elektrane trebaju zadovoljiti zahtjeve održivog razvoja te se utjecaj na okoliš treba zanemariti. Proliferacija nuklearnog materijala praktično mora biti onemogućena na tehnološkom nivou. Količina nuklearnog otpada treba se i mora smanjiti na najmanju razinu te također se uz to treba smaniti dugotrajan utjecaj na okoliš. Mogućnost oštećenja jezgre treba smanjiti na najmanju moguću mjeru i potrebno je postići izvrsnost u sigurnosti i pouzdanosti. Uz sve te zahtjeve potrebno je još eliminirati potrebu za planiranjem zaštitnih akcija izvan kruga postrojenja. U odnosu na ostale tehnologije potrebno je ostvariti ekonomsku prednost cjelogivnog ciklusa. No najveći odmak od prethodne generacije je ugradnja pasivnih sigurnosnih sustava čije se djelovanje oslanja na gravitaciju, prirodnu konvekciju i uskladištenu energiju, a ne na komponente ovisne o vanjskim naponskim izvorima.

LITERATURA

- [1] Hrvoje Požar: „Osnove energetike 2“, Izdavač: Školska knjiga, Zagreb 1992.
- [2] Lajos Jozsa: „Energetski procesi i elektrane“, Izdavač: Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2006.
- [3] Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim elektranama,
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/ET05b_NE2.pdf, Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb, 2011. (lipanj. 2017.)
- [4] Nuklearna energija, mistika i stvarnost, <http://www.nemis.hr/index.php/energetske-svrhe/nuklearni-reaktori-elektrane.html>, (12.03.2017.)
- [5] Mitsubishi Nuclear Energy Systems
<https://www.mnes-us.com/us-apwr/design-system-configuration>
- [6] Zmagoslav Prelec “Energetski sustavi“
http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/katedra4/Nuklearna%20energ.%20postr.%203%20pogl.pdf , Tehnički fakultet Rijeka, (lipanj 2017)
- [7] GE Hitachi Nuclear Energy, „ESBWR passive safety“
https://nuclear.gepower.com/content/dam/gepower-nuclear/global/en_US/documents/product-fact-sheets/ESBWR%20Passive%20Safety%20Fact%20Sheet.pdf (06.09.2017)
- [8] D. Feretić, N. Čavlina, N. Debrečin: „Nuklearne elektrane“, Izdavač: Školska knjiga, Zagreb, 1995.
- [9] Frane Martinić: „Nuklearni reaktori“, Zagreb 2015.
<https://documents.tips/documents/7-nuklearni-reaktori.html> (04.06.2017)
- [10] Jacopo Buongiorno „BWR Description“
https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-06-engineering-of-nuclear-systems-fall-2010/lectures-and-readings/MIT22_06F10_lec06b.pdf , (kolovoz 2017)
- [11] Idaho National Laboratory „Very high temperature reactor“
<http://www4vip.inl.gov/research/very-high-temperature-reactor/> (kolovoz 2017)
- [12] U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee „A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems“ December 2002 (kolovoz 2017)

SAŽETAK

Nuklearna elektrana je postrojenje u kojemu se energija oslobođena u nuklearnom reaktoru, koji radi na principu kontrolirane lančane reakcije, se koristi za proizvodnju pare koja pokreće turbinu električnog generatora. Fisija se drži pod kontrolom, odnosno kontrolira se broj neutrona u nuklearnom reaktoru. Energija veze po neutronu za teške jezgre je oko 7,2 MeV a za jezgre srednje mase je oko 8,2 MeV. Tako se u fisijskom procesu oslobodi 1 MeV energije po neutronu, a kako je ukupan broj neutrona oko 200, onda se u jednom fisijskom procesu oslobodi oko 200 MeV energije. U uvodnom dijelu dan je opis osnovnih reakcija vezanih za nuklearne elektrane. U glavnom dijelu rada prikazana je podjela nuklearnih reaktora u III i IV generaciji. U završnom dijelu napravljena je termodinamička analiza Rankineova ciklus za dva reaktora, reaktor hlađen i moderiran kipućom vodom te vrlo visokotemperaturni reaktor, te smo usporedili dobivene rezultate.

Ključne riječi: nuklearne elektrana, reaktor, fisija, Rankineov ciklus

ABSTRACT

Nuclear power plant is a facility where energy released from the nuclear reactor, which works on the principle of controlled chain reaction, is used to produce steam that drives the turbine of the electric generator. Fission is kept under control, the number of neutrons in the reactor is controlled. The neutron-binding energy for heavy cores is around 7.2 MeV and for medium mass cores is around 8.2 MeV. So the fission process releases 1 MeV energy by neutron, how is the total number of neutrons around 200, in one fission process is released around 200 MeV of energy. In the introductory part is given a description of basic reactions related to nuclear power plants. In main part of the work is shown how are nuclear reactors divided in III and IV generations. In final part is made thermodynamic Rankine-ov cycle analysis for two reactors, reactor cooled and moderated by boiling water and high temperature reactor, then I compared the results.

Keywords: nuclear energy, reactor, fission, Rankine cycle

ŽIVOTOPIS

Ivana Josipović rođena 02.09.1992. godine u Požegi. Osnovnu školu „Ivan Goran Kovačić“ završava u Velikoj sa odličnim uspjehom. Nakon završetka osnovne škole zainteresiranošću za tehničke predmete 2007. godine upisuje srednju Tehničku školu u Požegi. Godine 2011. završava srednju Tehničku školu smjer Telekomunikacije, te iste godine upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku, Preddiplomski stručni studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika. Stručni studij završava 2014. godine te odmah po završetku upisuje Razlikovne obveze na istom fakultetu za upis na Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika. Nakon uspješno završene Razlikovne obveze, 2015 godine upisuje Diplomski studij, smjer Održiva elektroenergetika te ga završava 2017. godine